

PRONÓSTICO CON COBERTURA NACIONAL DEL ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA

Nota Técnica N° 002-2016 SENAMHI

Luis Alfaro Lozano
Alan Llacza Rodriguez
Odón Sánchez Ccoyllo

Pronóstico con cobertura nacional del índice de radiación solar ultravioleta

Luis Alfaro Lozano¹, Alan Llacza Rodriguez², Odón Sánchez Ccoyllo³

RESUMEN

El SENAMHI viene desarrollando exitosas campañas de sensibilización para que las personas estén mejor preparadas frente a los efectos dañinos de la radiación ultravioleta (RUV), en particular informando sobre el índice ultravioleta (UVI por sus siglas en inglés) que es un valor numérico que expresa en forma sencilla el peligro a exponerse a quemadura solar por la irradiancia solar en el rango ultravioleta.

El pronóstico de este índice es una de las actividades operativas que se realiza a nivel mundial por casi todos los servicios meteorológicos del mundo y el SENAMHI lo viene realizando desde hace varios años aunque en forma limitada y restringida a 10 ciudades del país.

Desde nuestro punto de vista, esta limitación se debe a dos razones: la primera es que se vincula el pronóstico estrictamente a los puntos de observación en superficie y la segunda porque no se utilizan herramientas a disposición para desarrollar un sistema automatizado de pronóstico asociado a modelos numéricos meteorológicos y a observaciones satelitales de ozono.

La literatura científica ha demostrado que la irradiancia solar en el rango del espectro ultravioleta puede ser pronosticada como un valor máximo a nivel de superficie (cielo despejado, sin nieve y sin contaminación) teniendo en cuenta los cambios: de la cantidad de ozono estratosférico sobre un determinado lugar; del espesor del camino que deben atravesar los rayos solares para llegar a la superficie terrestre, determinado por el ángulo cenital solar que depende de la latitud, longitud, hora y día del año); de la distancia tierra sol, porque la tierra describe una elipse y no un círculo cuando recorre su camino alrededor del sol; y de la altitud, dado que los rayos solares son menos atenuados en la medida que más alto se encuentre el lugar.

De hecho la mayor variabilidad del UVI en superficie se explica principalmente por la atenuación de la radiación solar debido al ángulo del sol y a la columna de ozono, estos dos factores pueden ser caracterizados en forma general para cualquier punto

¹ Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica - DMA - SENAMHI

² Subdirección de Modelado Numérico SMN - DMA - SENAMHI

³ Subdirección de Evaluación Ambiental de la Atmósfera SEA - DMA - SENAMHI

del globo terráqueo, contándose con datos de satélite y pronósticos de ozono muy precisos para todo el globo en forma operativa todos los días.

También esta literatura muestra que hay factores de carácter local que pueden provocar cambios en la estimación del UVI, destacando la nubosidad, la presencia de aerosoles (por ejemplo contaminantes que absorben RUV) y la reflexión de la superficie como es el caso de la nieve. El efecto de la altitud también es una variable importante a tener en cuenta y los estudios muestran que también es afectada por la presencia de aerosoles.

En tal sentido, dado que las estaciones en superficie con las que se realizan mediciones podrían provocar que se subestime el UVI, si queremos pronosticar la irradiancia solar ultravioleta para el conjunto del territorio, se hace necesario elaborar pronósticos de UVI máximos utilizando los modelos numéricos que pronostican columna de ozono, para luego hacer el pronóstico del UVI para cielo despejado a nivel del mar y posteriormente realizar los ajustes de altitud y nubosidad.

En este trabajo se plantea una metodología para poner a disposición en 195 capitales provinciales del país, el pronóstico de la intensidad de la radiación solar ultravioleta, mediante el índice ultravioleta (UVI), como un indicador de su potencial para producir daño a las personas y para que se adopten medidas de protección.

INTRODUCCIÓN

La radiación Ultravioleta (UV)⁴, es una radiación en el espectro electromagnético en el rango de longitudes de onda⁵ entre 100 nm y 400 nm, correspondiente a una energía⁶ de aproximadamente doce (12) eV (electrón voltio). De este rango del espectro solar el ozono atmosférico absorbe completamente toda la radiación entre los 100 y 280 nm, mientras que para el rango entre los 280 y 315, la atmósfera absorbe casi el 90% de esta radiación denominada UVB.

Dado que la cantidad de radiación UVB que llega a la superficie está fuertemente relacionada con la capa de ozono, una reducción en esta capa implicará un aumento en la radiación que llega a la superficie terrestre. De ahí la preocupación mundial por los efectos de la radiación ultravioleta, teniendo en cuenta además que en el rango de los 315 a 400 nm la radiación UV es poco absorbida por la atmósfera (radiación UVA) y

⁴ En esta Nota Técnica usaremos las pautas de Environmental Health Criteria (EHC) 160: Ultraviolet Radiation. Published under the joint sponsorship of the United Nations Environment Programme, the International Labour Organisation, and the World Health Organization © WHO, Geneva, 1994. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc160.htm>

⁵ Expresado en metros 1 nanometro (nm) es igual a 1×10^{-9} metros

⁶ La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético, por esta razón la banda UVB es más energética que la banda UVA.

si bien no es tan energética como las anteriores, también provoca efectos dañinos y acumulativos sobre la piel.

Esta radiación se puede medir como una irradiancia incidente (potencia por unidad de área) expresada en W/m^2 , o como una exposición radiante, o dosis de energía que incide por unidad de área de superficie durante un período de tiempo, expresada en J/m^2 .

La radiación UV se clasifica de acuerdo a la OMS (2003) y CIE⁷ (2011) según los siguientes rangos del espectro electromagnético emitido por el sol⁸

Tabla 1: Rangos de radiación UV

Radiación UV	Rango de longitud de onda en nm	Características
UVA	315 - 400 nm	El extremo superior del rango corresponde al límite con la luz visible ⁹ es la que produce el bronceado. Este rango del espectro es muy poco absorbido por la atmósfera. Es causante del bronceado, dado que no tiene tanta energía, es menos peligrosa que el resto de UV. Esta radiación provoca el envejecimiento prematuro de la piel
UVB	280 - 315 nm	En este rango del espectro el ozono atmosférico absorbe casi el 90% de esta radiación. Esta radiación provoca daños en los ojos y en la piel, eritemas solares (enrojecimientos de la piel). La sobreexposición puede provocar cáncer de la piel. Dado que la cantidad de radiación UVB que llega a la superficie está fuertemente relacionada con la capa de ozono, una reducción en esta capa implicará un aumento en la radiación que llega a la superficie terrestre.
UVC	100 - 280 nm	El rango inferior de la banda (100 nm) corresponde al límite con los rayos X. En este rango del espectro, el ozono atmosférico absorbe completamente toda la radiación UVC. La UVC (muy energética) se obtiene de fuentes artificiales, tales como lámparas germicidas (lámparas UVC), usadas para matar bacterias y virus.

En la literatura científica se encuentra valores de 315 y 320 nm como la longitud de onda que divide UVA de UVB lo cual genera confusión. Nosotros seguiremos como referencia a la Comisión Internacional de Iluminación utiliza 280-315 nm como UVB y 315-400 nm como UVA, (CIE, 2011). Al parecer 320 nm es aplicado en medicina (dermatología) o en cosmética¹⁰, también varios libros de texto sobre UV usan 320 para dividir los rangos sin embargo lo importante es que la integración se realiza entre 280 y 400 nm, es decir cubre tanto UVB como UVA así como el Espectro de Acción Eritémica (CIE en base a la propuesta por McKinlay e Diffey (1987).

⁷ La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), establece como límite entre la banda UVB y UVA la longitud de onda de 315 nm (UVB: 280 nm a 315 nm) y la banda UVA (315 nm to 400 nm) (CIE, 2011).

⁸ Organización Mundial de la Salud 2003. Índice UV solar mundial: guía práctica. Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante

⁹ La radiación ultravioleta (RUV), la luz (V) y la radiación infrarroja (IR) son dos formas de radiación óptica que constituyen el espectro óptico. El término luz se reserva para las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 760 nm, que "provocan una respuesta visual en la retina" (CIE 17.4 - 1987)

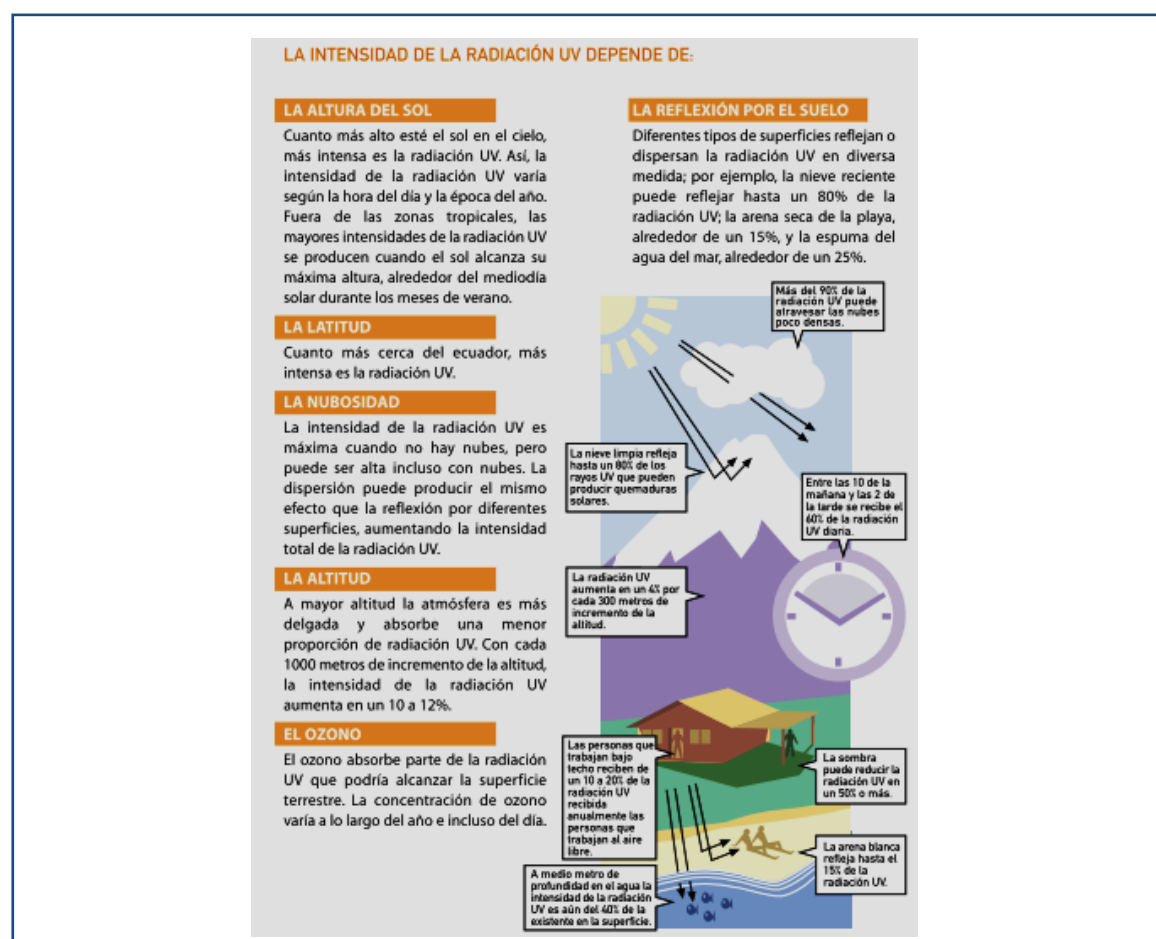
¹⁰ <http://www.temis.nl/uvradiation/info/index.html>

En la Tabla 2 se describe los valores promedio en el tope de la atmósfera de la irradiancia en esta banda del espectro electromagnético, Estos valores según Frederick et al. (1989) varían en función de la actividad solar y de la distancia tierra sol, aunque esta variación es pequeña si la comparamos con los efectos de la atenuación producida por la atmósfera terrestre (WHO, 1994). En superficie La radiación UV incide “con más intensidad” en las zonas ecuatoriales o muy elevadas, porque los rayos solares inciden perpendicularmente sobre esta zona (ver Figura 1).

Tabla 2: Radiación UV en el tope de la atmósfera

Banda de longitud de onda	Irradiancia (W m ⁻²)	Porcentaje respecto de UV	Porcentaje respecto del total UV + V + IR
UVC	6.4	5.7	0.5
UVB	21.1	18.6	1.5
UVA	85.7	75.7	6.3
UV (UVC+UVB+UBA)	113.2	100.0	8.3
Visible e infrarrojo (V+IR)	1254.0		91.7
UV+V+IR (total)	1367.2		100.0

Figura 1: Factores que determinan la intensidad de la RUV en superficie



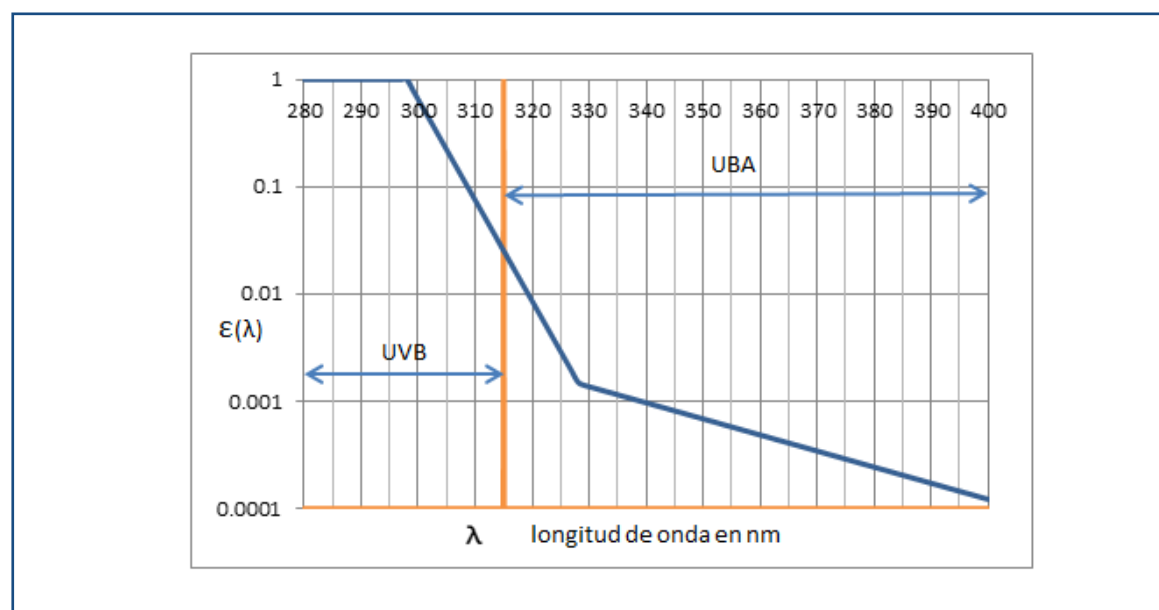
Tomado de OMS (1993) Índice UV Solar Mundial. Guía práctica. WHO/SDE/OEH/02.2

A medida que nos alejamos del ecuador los rayos solares son más oblicuos por lo que la intensidad de la radiación UV en superficie es menor, sin embargo, en estas mismas regiones mientras más alto estemos, la intensidad de la radiación UV aumenta. Aquí es de destacar que debido a que el ángulo de incidencia de la radiación solar es muy cercano a la perpendicularidad, los rayos solares tienen una menor superficie de reflexión y tienen un menor recorrido para llegar a superficie. Es por eso crítico el pronóstico de la intensidad de la UV en las zonas altas de los andes peruanos.

El Índice de radiación solar ultravioleta

El índice solar mundial ultravioleta (UVI, por sus siglas en inglés) descrito por la OMS (2003) “...es una medida sencilla de la intensidad de la radiación UV en la superficie terrestre y un indicador de su capacidad de producir lesiones cutáneas, que sirve como vehículo importante para hacer conciencia en la población y advertir a las personas de la necesidad de adoptar medidas de protección cuando se exponen a la radiación ultravioleta (UV)”¹¹

Figura 2: Espectro de acción eritemática¹² (McKinlay y Diffey, 1987)



El eritema es el enrojecimiento causado en la piel por el sol, el índice y la irradiancia eritemática expresa los efectos eritemáticos de la radiación solar. Para este efecto se tiene en cuenta tanto la curva espectral de radiación solar (entre longitudes de onda de 280 y 400 nm) incidente en el suelo, como la respuesta de la piel humana a la radiación UV incidente en la misma. Esta respuesta está modulada por un coeficiente de acción

¹¹ Este índice fue formulado por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) referido al espectro de acción de referencia para el eritema inducido por UV en la piel humana (ISO 17166: 1999 / CIE S 007 / E-1998).

¹² By Hankwang (Own work) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons

eritemática $\varepsilon(\lambda)$, establecido por McKinlay y Diffey, es máximo a partir de los 280 nm y va decreciendo conforme aumenta la longitud de onda, ver la Figura 2 elaborada en base a la ecuación E.2

De acuerdo a WHO (1994) los efectos biológicos de la UV dependen de las longitudes de onda de la radiación. Para determinar el riesgo se requiere información de la emisión espectral. Para este efecto se necesita medir o calcular la irradiancia espectral ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) de la fuente que emite.

La irradiancia total ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) se obtiene sumando para todas las longitudes de onda y el riesgo se mide “ponderando” el efecto de la irradiancia espectral de cada longitud de onda por el factor biológico (eficacia de cada longitud de onda para causar un efecto biológico). El proceso de sumar con este factor de ponderación nos da la Irradiancia efectiva o espectro eficaz (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ o en mW/m^{-2}). Ver Figura 3.

El coeficiente de acción eritemática permite estimar la exposición radiante requerida para producir un dado efecto biológico (eritema) por cada longitud de onda (irradiancia biológicamente efectiva. A partir de La suma de la irradiancia biológicamente efectiva sobre el período de exposición, podemos calcular la exposición radiante biológicamente efectiva (Jm^{-2}).

$$E_{\text{eritema}} = \int_{280}^{400} I(\lambda) * \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (\text{E.1})$$

Donde:

E_{eritema} es la irradiancia eritemática, $I(\lambda)$ es la irradiancia solar global a la longitud de onda λ a nivel de la superficie en W/m^2 .

$\varepsilon(\lambda)$ es el coeficiente de acción eritemática.

$$\varepsilon(\lambda) = \begin{cases} 1 & \text{para } 280 \leq \lambda \leq 298 \text{ nm} \\ 10^{[0.094(298-\lambda)]} & \text{para } 299 \leq \lambda \leq 328 \text{ nm} \\ 10^{[0.015(139-\lambda)]} & \text{para } 329 \leq \lambda \leq 400 \text{ nm} \end{cases} \quad (\text{E.2})^{13}$$

El índice ultravioleta UVI es un parámetro adimensional que se calcula multiplicando la irradiancia eritemática por una constante k_{er} :

$$\text{UVI} = k_{\text{er}} * \int_{280}^{400} I(\lambda) * \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (\text{E.3})$$

¹³ Ecuación adoptada por CIE (International Commission on Illumination), propuesta por McKinlay e Diffey (1987):

Donde:

$I(\lambda)$ es la irradiancia solar espectral ultravioleta expresada en W/m^2 a la longitud de onda λ , $\epsilon(\lambda)$ es el espectro de acción eritemática y K_{er} es una constante igual a $40 m^2/W$.

La integral tiene como límite inferior 280 nm, por debajo del cual toda la radiación es absorbida antes de llegar a la superficie de la Tierra, y el límite superior (400 nm) constituye la longitud de onda frontera entre el UVA y el espectro visible ¹⁴.

Los resultados obtenidos por numerosos centros de investigación permitieron elaborar una curva obtenida estadísticamente para estimar la mínima exposición radiante de UV necesaria para causar eritema¹⁵. Es decir la dosis mínima necesaria para producir un eritema (MED en inglés) “apenas perceptible en una piel no expuesta anteriormente”.

Sin embargo, los seres humanos no somos igualmente sensibles a la radiación UV debido a las diferentes capacidades de autoprotección de nuestra piel (pigmentación). Por ello para fines comparativos se calcula 1 MED, para piel blanca y una exposición radiante monocromática en la eficacia espectral máxima para eritema (alrededor de 295 nm), bajo este procedimiento 1 MED en $J m^{-2}$. En la Tabla 3 puede observarse algunos valores típicos diarios y anuales en unidades MED para el hemisferio norte desde los 20° de latitud.

Tabla 3: Valores MED

Diurnal UVB (MED)				
Geographical latitude	Winter	Spring/Autumn	Summer	Annual MED
20°N, e.g. Hawaii	14	20	25	6000
30°N, e.g. Florida	5	112	15	4000
40°N, e.g. central Spain	2	7	12	2500
50°N, e.g. Belgium	0.4	3	10	1500

Tomado¹⁶ de Diffey 1991. Puede observarse en este cuadro que la radiación UVB en verano es mayor que en invierno y más intensa mientras más nos acerquemos a la línea ecuatorial.

¹⁴ http://meteo.navarra.es/definiciones/radiacion_ultravioleta.cfm

¹⁵ WHO. Global Solar UV Index: a practical guide, WHO/SDE/OEH/02.2, disponible en español en: <http://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf>, Ginebra, Suiza; 2002.

¹⁶ Diffey, B. L. 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. Review in Physics in Medicine and Biology 36 (3): 299-328.

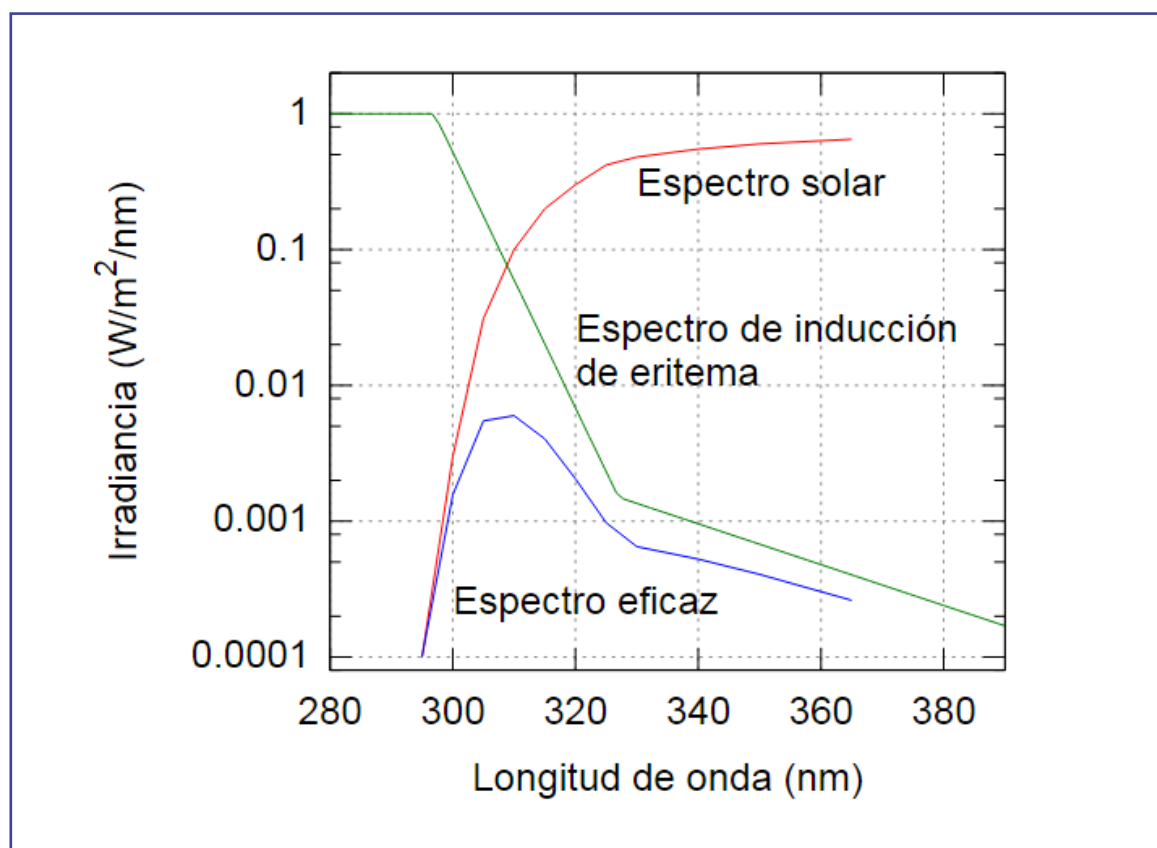
Cabe resaltar, como mencionáramos líneas arriba que la eficacia espectral máxima para eritema se da alrededor de los 295 nm es decir en la banda de la UVB. Por ello los investigadores buscan llamar la atención del público sobre el peligro que constituye la exposición crónica a la luz solar específicamente en lo referido a la UVB ya que acelera el envejecimiento de la piel e incrementa el riesgo de cáncer de piel (OMS, 2003), cabe agregar que en esta publicación se resalta la evidencia científica de que la incidencia de cáncer de piel está estrechamente relacionada con la latitud, la altitud y las condiciones atmosféricas y su relación directa con la exposición a la radiación solar ultravioleta.

En resumen a efectos de estandarizar la información a brindarse al público se estableció que:

- La influencia de la radiación UV sobre la piel se cuantifica por medio de la MED/hora (Dosis Eritémica Mínima por hora), la cual, es la dosis (potencia/área) efectiva mínima de radiación UV que produce enrojecimiento en la piel humana (eritema) tipo II.
- La irradiancia eritemática se determina como la magnitud de radiación (UVB y UVA) instantánea en unidades de potencia por unidad de superficie.
- Dado que los efectos producidos por la radiación ultravioleta tienen un efecto acumulativo, se introduce el tiempo de exposición. Para ello la Dosis Eritémica Mínima (MED), definida como la mínima irradiación (radiación instantánea) necesaria para producir un eritema o enrojecimiento de la piel, tras un determinado tiempo de exposición a la radiación.
- La sensibilidad de la piel a la radiación UV para producir el eritema es función de la longitud de onda y del fototipo de piel. Por ello se toma como unidad de referencia personas con piel blanca ligeramente pigmentada (piel tipo II). Para este fototipo (II) y de acuerdo al UVR Research Institut¹⁷, 1 MED tiene un valor de: $21 \text{ mJ/cm}^2 = 210 \text{ J/m}^2$
- Debido a la conversión de unidades, se encuentra la relación entre las unidades radiométricas y los MED/hora: $1 \text{ MED/hora} = 5.83 \text{ mW/m}^2$
- Específicamente, el Índice UV es la escala integrada de radiaciones espectrales entre 280 y 400 nm medido por el espectro de acción eritemática definido por la Commission Internationale de l'Eclairage-CIE (McKinlay y Diffey, 1987).

¹⁷ http://meteo.lcd.lu/uvi_calculator/02-UVI-Calculations-2-7.PDF

Figura 3: Irradiancia espectral UV y el espectro de acción eritemática¹⁸



En la Figura 3 se puede apreciar que a partir de 320 nm los cambios de la irradiancia solar son pequeños mientras que para longitudes de onda a partir de 295 nm hasta 315, pequeños cambios significan importantes cambios en la irradiancia¹⁹. Por otro lado el espectro de acción eritemática cambia fuertemente hasta cerca de 320 nm para luego “suavizar” su pendiente. Como resultado de integrar estos dos efectos se obtiene el espectro eficaz. (Ver ecuación E.1)

Entonces el índice UV (UVI) surge del acuerdo internacional de asignar una numeración que empieza de cero según los siguientes rangos (Tabla 4):

¹⁸ By Hankwang (Own work) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons

¹⁹ La Figura 3 tiene en ordenadas una escala logarítmica.

Tabla 4: UVI y rangos expresados en $J\ m^{-2}\ h^{-1}$, en UVI (Ecuación 1)

UVI	Rango inferior	Rango superior	Rango inferior	Rango superior	Rango inferior	Rango superior	Rango inferior	Rango superior	Rango inferior	Rango superior
	$J\ m^{-2}\ h^{-1}$	$J\ m^{-2}\ h^{-1}$	$J\ m^{-2}\ h^{-1}$	$W\ m^{-2}$	$40\ W\ m^{-2}$	$40\ W\ m^{-2}$	$1/25\ mWm^{-2}$	$1/25\ mWm^{-2}$	$58.33/25\ (MED/h)$	$58.33/25\ (MED/h)$
1	0	99	0.000	0.028	0.000	1.100	0.000	1.100	0.000	1.100
2	100	199	0.028	0.055	1.111	2.211	1.111	2.211	1.111	2.211
3	200	299	0.056	0.083	2.222	3.322	2.222	3.322	2.222	3.322
4	300	399	0.083	0.111	3.333	4.433	3.333	4.433	3.333	4.433
5	400	499	0.111	0.139	4.444	5.544	4.444	5.544	4.444	5.544
6	500	599	0.139	0.166	5.556	6.656	5.556	6.656	5.556	6.656
7	600	699	0.167	0.194	6.667	7.767	6.667	7.767	6.667	7.767
8	700	799	0.194	0.222	7.778	8.878	7.778	8.878	7.778	8.878
9	800	899	0.222	0.25	8.889	9.989	8.889	9.989	8.889	9.989
10	900	999	0.250	0.278	10.000	11.100	10.000	11.100	10.000	11.100
11	1000	1099	0.278	0.305	11.111	12.211	11.111	12.211	11.111	12.211
12	1100	1199	0.306	0.333	12.222	13.322	12.222	13.322	12.222	13.322
13	1200	1299	0.333	0.361	13.333	14.433	13.333	14.433	13.333	14.433
14	1300	1399	0.361	0.389	14.444	15.544	14.444	15.544	14.444	15.544

Nótese que $1\ UVI = 40\ Eeritema\ (W/m^2) = 1/25\ Eeritema\ (mW/m^2)$ de la Ecuación 1

Categorías de exposición y el UVI

Considerando que el UVI “es una medida de la intensidad de la radiación UV sobre la superficie terrestre que tiene relación con los efectos sobre la piel humana”, se recomienda lo siguiente (OMS, 2003):

1. La información sobre el UVI debe proporcionar al menos el valor máximo diario. En la predicción o comunicación de un máximo diario debe utilizarse el valor medio de 30 minutos.
2. El UVI debe presentarse como un valor único redondeado al número entero más próximo.
3. Cuando la nubosidad es variable el UVI debe notificarse mediante un intervalo de valores. Las predicciones del UVI deben tener en cuenta los efectos de las nubes sobre la transmisión de la radiación UV a través de la atmósfera.
4. Los programas que no tengan en cuenta los efectos de las nubes en sus predicciones deberán especificar que se trata de un UVI “con cielo despejado” o “sin nubes”.
5. Los valores del UVI se dividen en categorías de exposición.
6. Los servicios de información meteorológica de un país o de un medio de comunicación pueden informar sobre la categoría de exposición, el valor o intervalo de valores del UVI o ambos.

El UVI no significa índice ultravioleta B

En este punto es importante destacar que el UVI se estima en el rango del espectro entre 280 y 400 nm (ver ecuación 1) veamos con un ejemplo el efecto de utilizar sólo el rango UVB, para este propósito utilizaremos el modelo TUV²⁰ que operativamente utiliza el SENAMHI.

Como datos de entrada utilizaremos los siguientes datos:

Latitud: 16.413741° sur
Longitud: 71.534438° oeste
Altitud: 2.3 km)
Ozono total: 254 UD
Hora: 17 UTC (12 horas local)

A igualdad de todos los demás parámetros que usa por defecto el TUV sólo se ha cambiado el rango para el cálculo del UVI obteniéndose lo siguiente:

Tabla 5: Efecto del cálculo del UVI al restringir el rango del espectro ultravioleta

Fecha	Rango (280-320)	Rango (280-400)	Diferencia
21/06/2016	7.52	8.93	1.41
02/11/2016	15.89	17.93	2.04
	UVB	UVI (UVB + UVA)	

Es decir restringir el rango del espectro ultravioleta a sólo UVB para calcular el índice ultravioleta provoca una subestimación del UVI haciéndolo no intercomparable²¹ con los reportes internacionales.

En tal sentido es necesario que la red de observación esté adecuada para estimar el UVI considerando el total del espectro ultravioleta, para efecto de intercomparabilidad de las mediciones y con el propósito de que sea utilizada para el proceso de verificación del pronóstico y para continuar las investigaciones que se han venido desarrollando en el país sobre esta materia.

Ley de Atenuación Atmosférica

La ley de atenuación o ley de Beer-Lambert, también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la irradiancia solar que llega al suelo con el espesor óptico total de la atmósfera (en función de la longitud de onda) y el ángulo cenital solar²² (Bodhaine et al. 1999).

²⁰ http://cprm.acom.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV/

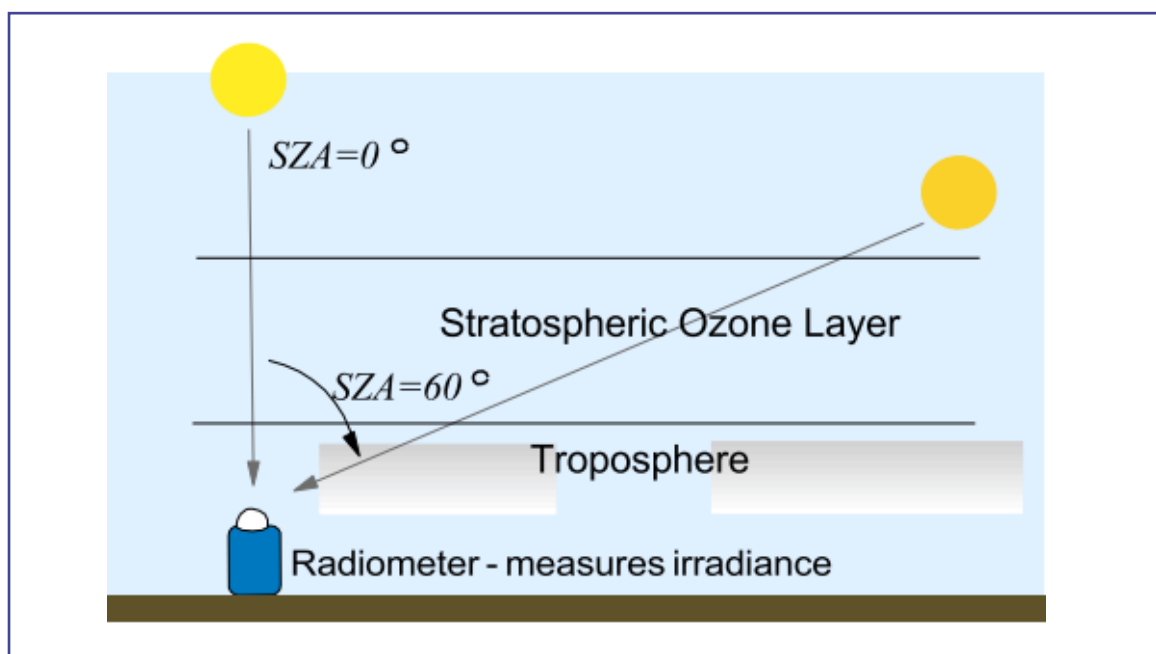
²¹ La red del SENAMHI utiliza el rango 280 - 320 nm

²² El espesor óptico puede ser considerado como profundidad óptica cuando el ángulo cenital solar es 0°.

De acuerdo a estos autores la profundidad óptica total es la suma de la profundidad óptica de Rayleigh, la profundidad óptica de aerosoles y la profundidad óptica debido a la absorción de gases como ozono, vapor de agua, etc. Teniendo en cuenta que estamos tratando del pronóstico de UVI es de interés (dada la longitud de onda de la radiación solar en la banda UV) la profundidad óptica de Rayleigh, en la atenuación de la radiación solar en ese rango del espectro.

Cabe agregar que la profundidad óptica de Rayleigh depende únicamente de la presión atmosférica (en realidad depende del número de moléculas por unidad de área de la columna de aire encima del lugar) y la atenuación depende de este espesor y del ángulo cenital solar (Bodhaine et al. 1999).

Figura 5: El ángulo cenital solar (SZA) y capa de ozono son claves para la estimación del UVI



Tomado de Wei Gao²³ <http://nadp.nrel.colostate.edu/UVB/publications/UV-Primer.pdf>

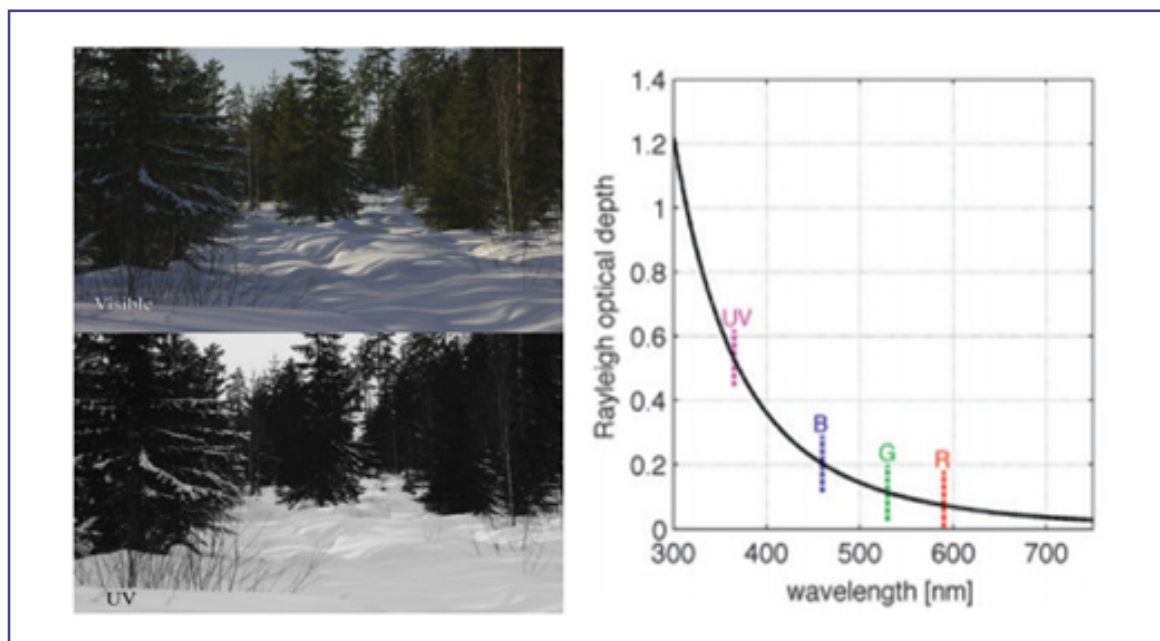
A efectos de mostrar visualmente la importancia de la dispersión de Rayleigh, Anders V. Lindfors y Lasse Ylianttil (2016)²⁴, adaptaron una cámara fotográfica para comparar fotografías de la atmósfera del espectro visible con las tomadas usando la banda de longitud de onda ultravioleta (UV).

En la fotografía (Figura 6) se observan las sombras de los árboles mientras que en la inferior no, ya que es una imagen tomada en la banda UV. Esto quiere decir que bajo sombra aún podemos recibir radiación UV, debido, además de la reflexión, a la radiación difusa.

²³ Professor Ecosystem Science and Sustainability Department. Director, USDA UV-B Monitoring Program Natural Resource Ecology Laboratory Colorado State University.

²⁴ <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-14-00260.1>

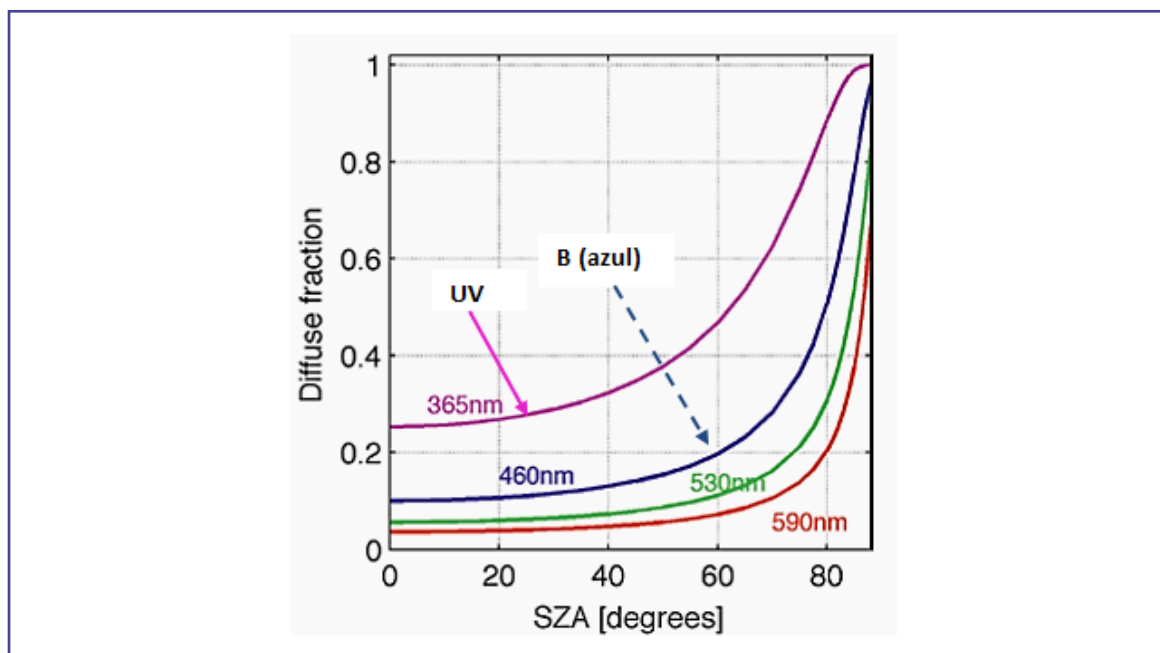
Figura 6: Fotografía banda visible vs banda UV



Tomada de Anders V. Lindfors y Lasse Ylianttil (2016)

Los autores de este artículo también muestran que la radiación UV dada su menor longitud de onda que la visible es más difundida en la atmósfera terrestre que el color azul, típico de los cielos despejados (Figura 7)

Figura 7: Difusión (en función de longitud de onda) vs Ángulo Cenital Solar (SAZ)



Tomada de Anders V. Lindfors y Lasse Ylianttil (2016)

En la figura anterior se muestra la contribución fraccional de la radiación difusa a la irradiancia horizontal (CF) global bajo condiciones de cielo despejado. Nótese que la atmósfera terrestre difunde la radiación UV aún para ángulos cenitales grandes (al comienzo del día y al final de la tarde) en forma proporcionalmente mayor que la luz visible.

Sobre todo hay que destacar en este punto que con la luz sobre el horizonte (SZA =90°), la radiación solar sólo puede alcanzar la superficie, debido a la radiación difusión (CF =1), sin embargo puede apreciarse en la Figura 7 que para el caso de la radiación ultravioleta la contribución fraccional de la radiación difusa a la irradiancia horizontal llega a 1, para esta longitud de onda (365 nm) a 85°.

Estimación de UVI con información de ozono total y el ángulo cenital solar

En el año 2004 Allaart et al. (2004) publicó un artículo sobre un modelo empírico para predecir el UVI bajo condiciones de cielo despejado, basándose en el ángulo cenital solar y el ozono total, dos cantidades predecibles y disponibles operativamente en la actualidad.

El modelo empírico se obtuvo ajustando los datos observados de UVI y ozono para latitudes medias (De Bilt: 52.1 latitud norte y 5.13° longitud este) y en los trópicos (Paramaribo: 5.81° sur y -55.21° longitud oeste). El ajuste se realizó considerando “lo esencial de la física subyacente” dando buenos resultados consistentes “para todos los ángulos cenitales solares entre 0 y 90 y una amplia gama de valores de ozono total”

El método de estos autores consistió en dos etapas, en una primera consideraron una atmósfera sin ozono, en este caso el UVI es denominado UVA que depende principalmente del ángulo cenital solar (SZA) y de la distancia entre el sol y la tierra, planteando como “razonable aproximación la siguiente ecuación:

$$UVA = \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 S_0 \mu_0 \exp\left(-\frac{\tau_0}{\mu_0}\right) \quad (E.4)$$

Donde:

τ_0 es el la dispersión molecular y la extinción de aerosoles para SZA=0

S_0 es el valor de UVA en el tope de la atmósfera para $D=D_0$

D es la distancia entre el sol y la tierra en Unidades Astronómicas (UA)

D_0 es la distancia promedio entre el sol y la tierra (en UA). Mediante una expresión en términos de series de Fourier²⁵ desarrollada por Spencer (1971)

²⁵ <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6839/10Nvm10de17.pdf?sequence=11>

$$\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 = x_1 + x_2 \cos(\Gamma) + x_3 \sin(\Gamma) + x_4 \cos(2\Gamma) + x_5 \sin(2\Gamma) \quad (\text{E.5})$$

Donde:

$$\text{ángulo diario} = \Gamma = 2 \frac{\pi}{365} (dn - 1) \quad dn = \text{día del año}$$

$$x_1 = 1.000110, x_2 = 0.034221, x_3 = 0.001280, x_4 = 0.000719, x_5 = 0.000077$$

$$\mu_0 = \cos(SZA) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (\text{E.6})$$

Donde:

SZA es el ángulo cenital solar, φ es la latitud, δ es la declinación y ω es la hora solar.

De acuerdo a las observaciones UVA no es cero a pesar de que $\cos(SZA)$ es cero esto se debe al papel de la dispersión de Rayleigh aún para ángulos cenitales solares grandes. Para tomar en cuenta este efecto, hicieron un ajuste mediante la siguiente expresión μ_x

$$UVA = \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 S \mu_x \exp\left(-\frac{\tau_0}{\mu_x}\right) \quad (\text{E.7})$$

$$\text{Donde: } S = 1.24 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}, \tau_0 = 0.58, \epsilon = 0.17$$

= $\mu_0(1 - \epsilon) + \epsilon$ Allaart et al. (2004), entonces E4 queda como sigue

$$UVI = UVA \left(F * X^G + \frac{H}{TO} + J \right) \quad (\text{E.8})$$

Donde:

$$X = 1000 * \frac{\mu_0}{TO}, F = 2, G = 1.62, H = 280, J = 1.4$$

Luego se calcula el UVI como una función de UVA, μ_0 y la columna de ozono (TO). Actualmente esta parametrización es usada por la agencia espacial europea (KNM/ESA²⁶) para realizar el pronóstico global de UVI²⁷ para cielo despejado utilizando en base los datos basados en satélites. Como un ejemplo en la Figura 8 se muestra la variación diaria del UVI para Pucallpa - Perú (8.38 sur, 74.55 oeste). El registro fue obtenido²⁸

Por otro lado Madronich (2007)²⁹, considerando la fuerte dependencia del UVI con el ozono total y el ángulo cenital solar, formula una ecuación aproximada para estimar el índice UV, sin considerar el albedo de la superficie y bajo condiciones de cielo despejado y sin contaminación. Bajo estas condiciones:

$$UVI \sim 12.5 \mu_0^{2.42} \left(\frac{\Omega}{300}\right)^{-1.23} \quad (\text{E.9})$$

Donde:

μ_0 es el coseno de SZA y Ω es el ozono total (en unidades Dobson, DU³⁰).

²⁶ <http://www.temis.nl/uvradiation/SCIA/uvief.php?Year=2016&Month=10&Day=14>

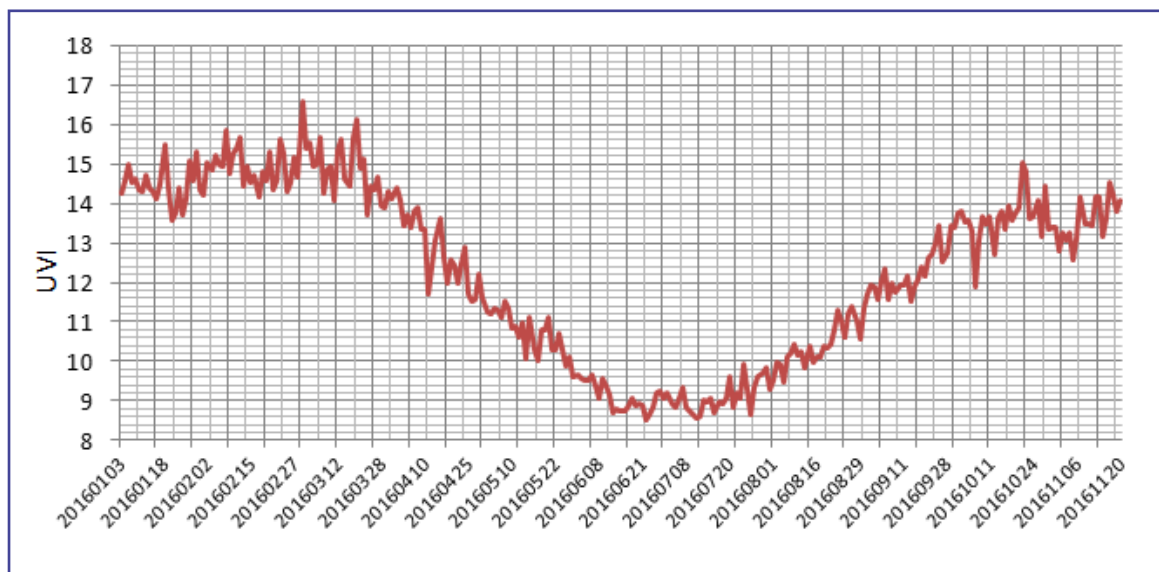
²⁷ <http://www.temis.nl/uvradiation/UVindex.html>

²⁸ http://www.temis.nl/uvradiation/archives/overpass/uv_Pucallpa_Peru_ENS.dat

²⁹ Madronich, S., 2007: Analytic formula for the Clear-sky UV Index. Photochemistry and Photobiology, 83,

³⁰ La Unidad Dobson (UD) es la cantidad de ozono expresada en unidades de 0.01 milímetros de espesor a nivel del mar y a la presión estándar (1013.25 hPa) y temperatura estándar (0.0 Celsius). Por ejemplo 300 DU es equivalente a 3 mm de espesor. 1537-1538, doi:10.1111/j.1751-1097.2007.00200.

Figura 8: Variación diaria de UVI, para Pucallpa (parametrización de Allaart et al. 2004)



Elaborado con base a los datos de ESA (Agencia Espacial Europea) /KNMI (Royal Netherlands Institute)

De acuerdo a Madronich la dependencia de μ y Ω se basa en un modelo físico simple de transmisión atmosférica biológicamente ponderada en las bandas espectrales UVB y UVA, con coeficientes ajustados a un modelo de transferencia radiativa.

Lo interesante es que otros factores pueden ser luego adicionados para ajustar el valor del índice. Nuevamente nos encontramos que la parametrización para la estimación del índice UV tiene como base principal la estimación de la columna de ozono total y el ángulo cenital solar³¹.

Madronich (2007), precisa en su investigación que esta ecuación tiene una exactitud del 10% o mayor con ángulos cenitales entre 0 y 60° y valores de ozono entre 200 y 400 Unidades Dobson (UD), en condiciones de cielo despejado y sin contaminación. La importancia del ángulo cenital solar en la ecuación radica en su relación con la atenuación de la irradiancia solar debido a la dispersión atmosférica.

Veamos la aplicación de la fórmula de Allaart et al y Madronich relacionando directamente, la evolución horaria del UVI, con el ángulo cenital y el ozono total (UD), y comparando los UVI obtenidos por ambos métodos con el UVI obtenido por el modelo TUV que actualmente usa el SENAMHI. Tabla 6 y Figura 9.

³¹ El ángulo cenital solar, es el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol.

Cabe agregar que el modelo TUV³² que operativamente utiliza el SENAMHI, fue utilizado con la longitud de -78.7° para que las 12 (hora solar) coincidiese aproximadamente con ese meridiano. Puede observarse una concordancia general entre los tres modelos, pero hay mejor ajuste³³ del modelo de Allaart et al., con los valores de UVI el TUV que los obtenidos con la ecuación de Madronich.

Teniendo en cuenta la altitud de 2336 msnm el índice IUV, se utilizará el ajuste por altitud con una tasa de crecimiento del UVI de 5% cada 1000 m, para este caso el UVI a las 12 horas solar se incrementa (redondeado) en dos (2) unidades más, es decir 14 y 15 respectivamente.

Tabla 6: Ejemplo de aplicación de las fórmulas de Allaart et al., Madronich (hora solar)

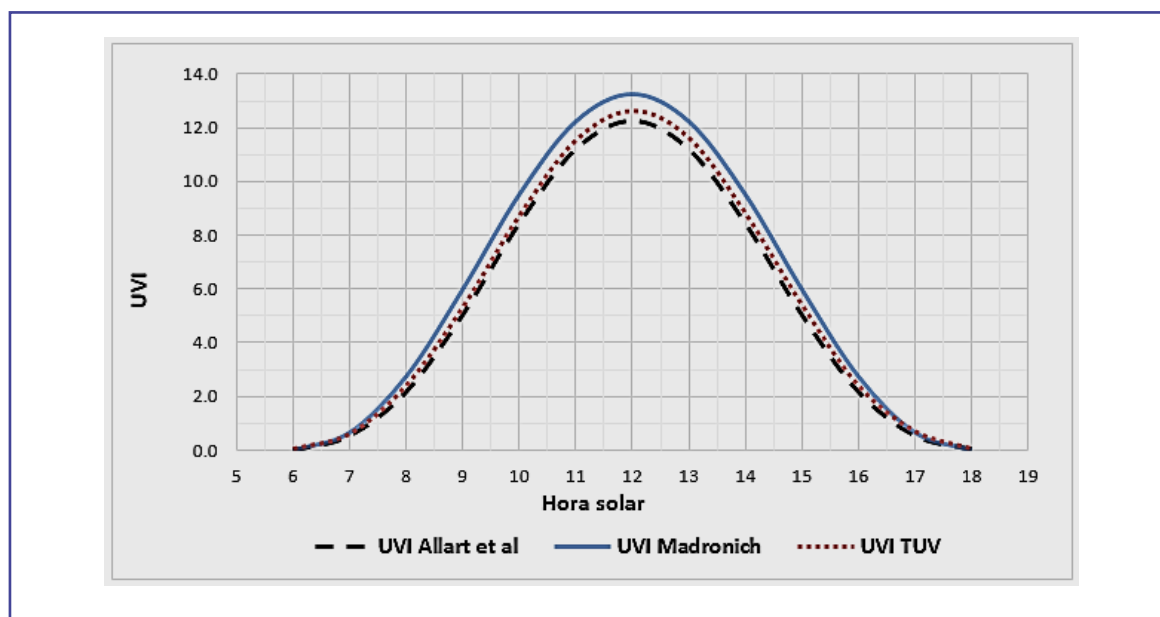
Hora	ángulo cenital solar	UVI Allaart et al	UVI Madronich	UVI TUV
6	87.7	0.0	0.0	0.1
7	73.4	0.5	0.7	0.6
8	59.0	2.2	2.8	2.4
9	44.6	5.1	6.0	5.3
10	30.4	8.5	9.5	8.7
11	16.8	11.2	12.3	11.5
12	8.2	12.3	13.3	12.6
13	16.8	11.2	12.3	11.6
14	30.4	8.5	9.5	8.8
15	44.6	5.1	6.0	5.4
16	59.0	2.2	2.8	2.4
17	73.4	0.5	0.7	0.7
18	87.7	0.0	0.0	0.1

En este ejemplo se calculó el índice UV considerando una columna de ozono con 280 UD, el día 288 (14/10/2016), para una localidad a una latitud de -16.3988° y una longitud de -78.7° . Nótese que para el caso del modelo TUV los valores no son exactamente simétricos dado que la longitud utilizada (78.7 oeste) es sólo una buena aproximación al valor exacto de longitud para obtener las 12 horas solar.

³² http://cprm.acom.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV/

³³ La diferencia cuadrática media respecto del TUV para Madronich, es 2 veces mayor que la de Allaart

Figura 9: Estimación de UVI usando las fórmulas Allaart, Madronich y el modelo TUV



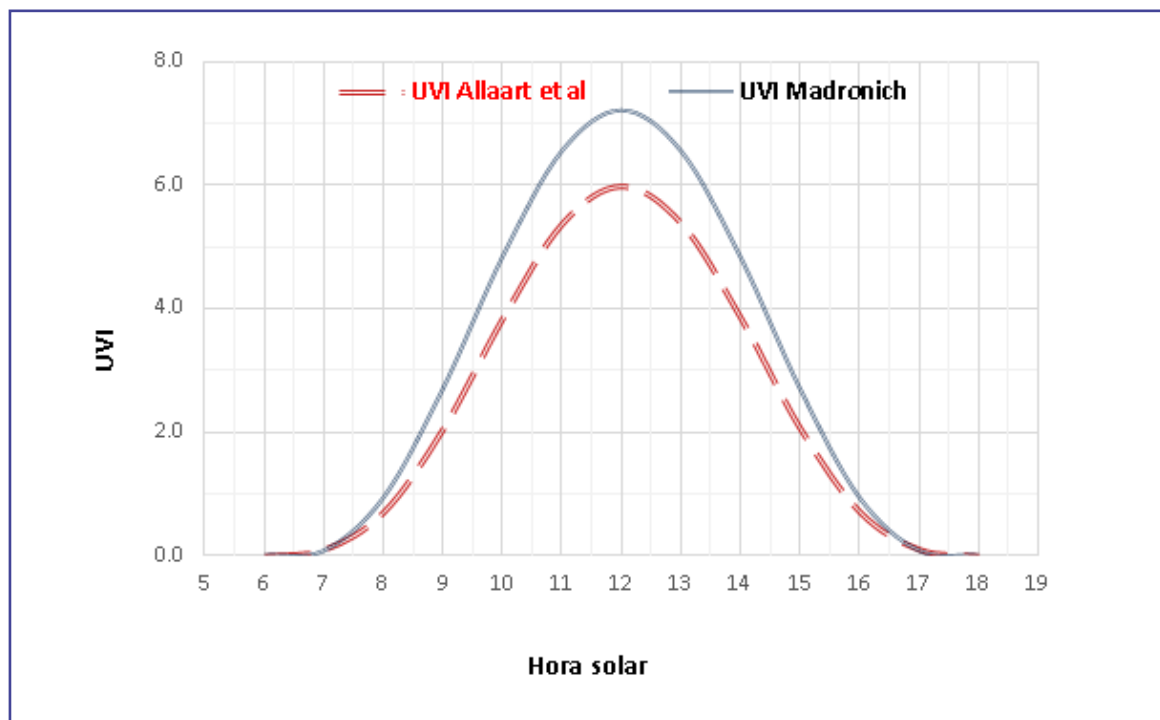
La línea discontinua corresponde a la variación del UVI con la hora solar estimado por Allaart et al., la continua a Madronich y la línea de puntos al UVI obtenido del TUV.

Ahora haremos una comparación para evaluar el efecto de la época del año sobre el UVI calculado con la parametrización de Allaart et al. y el calculado según Madronich, en este caso utilizaremos el mismo valor de la columna de ozono y consideraremos como fecha 21 de junio de 2016. Tabla 7 y Figura 10

Tabla 7: Ejemplo de aplicación de las fórmulas de Allaart et al., Madronich para 21/06/2016

Hora	ángulo cenital solar	UVI Allaart et al	UVI Madronich	UVI (TUV)
6	96.45	0.0	0.0	0.1
7	83.37	0.1	0.1	0.6
8	70.87	0.7	0.9	2.4
9	59.33	2.1	2.7	5.3
10	49.47	3.8	4.8	8.7
11	42.45	5.4	6.6	11.5
12	39.84	6.0	7.2	12.6
13	42.45	5.4	6.6	11.6
14	49.47	3.8	4.8	8.8
15	59.33	2.1	2.7	5.4
16	70.87	0.7	0.9	2.4
17	83.37	0.1	0.1	0.7
18	96.45	0.0	0.0	0.1

Figura 10: Estimación de UVI usando las fórmulas Allaart, Madronich para el 21 Junio de 2016



La distancia tierra sol es mayor en Junio y se observa en la parametrización de Allaart et al.

La causa de la diferencia para esta época del año es que justamente la parametrización de Allaart et al. considera el efecto de la distancia entre la tierra y el sol en el valor de la “constante solar”, también tiene influencia en valor del UVI el ajuste en el ángulo cenital solar realizado utilizado por Allaart et al. para tomar en cuenta el efecto de la dispersión atmosférica.

Al respecto es de destacar que este es un tema de investigación a desarrollar para el Perú, por ejemplo Elminir (2007) encontró en una investigación sobre el impacto de los contaminantes sobre la radiación UV que en El Cairo, Egipto la variación anual de la radiación ultravioleta (UV) disminuye año tras año. Esta tendencia negativa es en parte debido a la contaminación del aire que en algunos casos puede llegar a casi 40%.

Por este motivo se sugiere hacer una investigación, mediante el análisis de la serie temporal de mediciones de radiación ultravioleta, material particulado respirable (PM₁₀, partículas cuyo diámetro aerodinámico menores a 10 micrómetros), material particulado fino (PM_{2.5}, partículas cuyo diámetro aerodinámico menores a 2.5 micrómetros), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono superficial (O₃) y monóxido de carbono (CO), con el objetivo principal de analizar la influencia de los contaminantes atmosféricos en la absorción y reflexión de la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra. Los resultados de esta investigación servirán para mejorar el pronóstico de radiación ultravioleta.

Por otro lado, se recomienda estimar la radiación ultravioleta utilizando el modelo de la calidad del aire WRF-Chem. Actualmente, la radiación ultravioleta no está disponible en las salidas del modelo WRF-Chem, pero si recomienda activar la radiación ultravioleta para que salga en las salidas de dicho modelo. El modelo WRF-chem es utilizado por el SENAMHI para realizar el pronóstico numérico de la calidad del aire en Lima metropolitana (<http://www.peruclima.pe/?p=calidad-de-aire-numerico>).

Dado el mejor ajuste de Allaart et al. (2003), para propósitos operativos y de control de calidad, ya que están disponibles datos globales de UVI para cielo despejado publicados diariamente por la Agencia Espacial Europea – Servicio Meteorológico Holandés (KNMI), se utilizará esta parametrización para el pronóstico de UVI para cielo despejado.

Pronóstico del Índice Ultravioleta (UVI)

El 6 de noviembre de 2013 se promulgó la Ley N° 30102 Ley que dispone medidas preventivas contra los efectos nocivos para la salud por la exposición prolongada a la radiación solar, en la indicada norma se establece en su Artículo 1 que esta Ley tiene el objeto de establecer medidas de prevención, que las instituciones y entidades públicas y privadas tienen que adoptar, para reducir los efectos nocivos para la salud ocasionados por la exposición a la radiación solar.

Específicamente en el Artículo 2, se asigna a los titulares de las instituciones y entidades públicas y privadas la responsabilidad de desarrollar actividades destinadas a informar y sensibilizar al personal a su cargo acerca de los riesgos por la exposición a la radiación solar y la manera de prevenir los daños que esta pueda causar, asimismo:

- Disponer que las actividades deportivas, religiosas, institucionales, cívicas, protocolares o de cualquier otra índole que no se realicen en ambientes protegidos de la radiación solar se efectúen preferentemente entre las 8:00 y las 10:00 horas o a partir de las 16:00 horas.
- Proveer el uso de instrumentos, aditamentos o accesorios de protección solar cuando resulte inevitable la exposición a la radiación solar, como sombreros, gorros, anteojos y bloqueadores solares, entre otros.
- Disponer la colocación de carteles, avisos o anuncios en lugares expuestos a la radiación solar en su jurisdicción, donde se incluya lo siguiente: “La exposición prolongada a la radiación solar produce daño a la salud”.
- Promover acciones de arborización que permitan la generación de sombra natural en su jurisdicción.

Es de destacar que en el Artículo 7, de la Ley se establece que el Poder Ejecutivo, a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), debe difundir diariamente los niveles de radiación ultravioleta en el país, así como sus efectos nocivos para la salud.

Esta actividad la ha venido desarrollando el SENAMHI incluso antes de que se publique esta norma aunque en forma limitada dado que si bien hace difusión y realiza pronósticos no hay una cobertura nacional que permita sensibilizar de los peligros de la RUV al restringirse la información de 10 ciudades. Debido a que se consideraba que la cobertura de la información se restringe a los puntos donde se cuenta con observaciones en superficie.

Sin embargo este criterio no es seguido por todos los servicios meteorológicos dado que se cuentan con información robusta de ozono atmosférico de larga data y numerosa literatura científica que permite una cobertura detallada del territorio para UVI máximo o potencial. Veamos un ejemplo

El servicio meteorológico de EE.UU. calcula el Índice UV utilizando un modelo numérico que relaciona la irradiancia a nivel de superficie, de la radiación UV con la concentración de ozono estratosférico pronosticada, la nubosidad pronosticada y la altitud³⁴.

La NOAA realiza el pronóstico de UVI sin utilizar observaciones en tierra. El cálculo comienza con los datos de ozono a nivel mundial obtenidos por satélite operados por la NOAA. Estos datos se utilizan para producir un pronóstico de los niveles de ozono estratosférico para el día siguiente.

El modelo numérico utiliza en cada punto, el pronóstico de ozono y el ángulo de incidencia de la luz solar³⁵ o ángulo cenital solar³⁶ (SZA por sus siglas en inglés), para calcular la irradiancia en superficie considerando un modelo de transferencia radiativa, es decir se requiere estimar (calcular) la interacción entre la radiación solar entrante y la atmósfera de nuestro planeta. Ver figura 11.

En esta figura la absorción debida al ozono y contaminantes atmosféricos está representada por f_A , la dispersión debida a las moléculas, nubes y aerosoles está representada por f_S y f_G representa la absorción en el suelo.

En este esquema la reflexión en el suelo debido a la nieve (albedo) es casi 100%, lo cual implica que una persona expuesta a UVB en un sitio con nieve está más en riesgo que otra en la que el suelo no tiene nieve. La suma de f_A , f_S y f_G equivale a la radiación total que ingresa a la atmósfera.

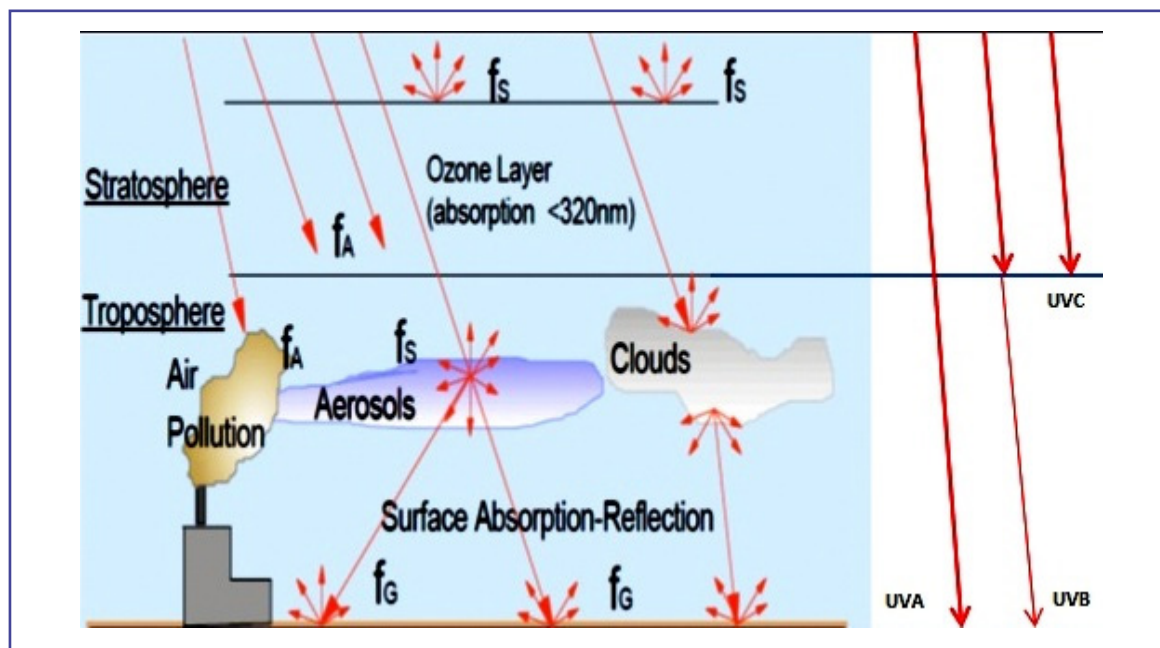
Como ya se describió el ozono en la atmósfera absorbe longitudes de onda UV más cortas “con más fuerza” que las longitudes de onda más largas. El rango del análisis para

³⁴ http://www.epa.gov/sunwise/doc/what_is_uvindex.htm

³⁵ El ángulo de la luz del sol está determinado por la latitud, día del año y la hora del día (mediodía solar)

³⁶ El ángulo cenital solar (SZA) se cuenta desde la vertical hacia el horizonte. Cuando el sol está directamente encima del observador, el cenit tiene un ángulo de 0 °, mientras que cuando el sol está sobre el horizonte, el ángulo cenital es 90 °.

Figura 11: Los modelos de transferencia radiativa deben tomar en cuenta la interacción entre la radiación entrante y nuestra atmósfera



Adaptado de Wei Gao³⁷ <http://nadp.nrel.colostate.edu/UVB/publications/UV-Primer.pdf>

la estimación del UVI se estima para el espectro entre 280 y 400 nm (UVB y UBA) dado que la UVC es absorbida totalmente por el ozono estratosférico.

A continuación se muestra un ejemplo tomado de la página web de la EPA³⁸, para un cálculo hipotético del UVI. Ver Tabla 8.

Tabla 8: Ejemplo hipotético de cálculo de UVI

Longitud de onda en nm (1)	Irradiancia solar (2)	Espectro de acción eritemática (3)	Espectro eficaz (4)	Efecto de la altitud (5)	Efecto de la nubosidad (6)
290	4	15	60	63.0	46.0
320	26	5	130	136.5	99.6
400	30	3	90	94.5	69.0
Total			280	294.0	214.6
Índice UV			11	12	9

³⁷ Professor Ecosystem Science and Sustainability Department. Director, USDA UV-B Monitoring Program Natural Resource Ecology Laboratory Colorado State University.

³⁸ Es decir, el espectro completo de UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm)

En la segunda columna se muestran los valores de irradiancia solar que llegarían a nivel del mar después de correr el modelo que pronostica la atenuación debida al ozono y la inclinación de los rayos solares.

En la tercera columna se presentan los valores asociados a la sensibilidad humana a la radiación UV, como ya se describió anteriormente, las longitudes de onda UV más cortas causan más daños en la piel que longitudes de onda UV más largas a la misma intensidad.

Con estos valores se pondera para cada banda de UV en función del espectro de acción eritemática de McKinlay-Diffey (columna (3)³⁹) y se obtiene la columna (4). Este proceso es el equivalente a lo presentado en la Ecuación 1, cuyo resultado sería la suma de $60+130+90=280$ (ver tabla 7, columna 4)

Para este ejemplo se asume que la localidad donde se hace el pronóstico se encuentra a una altitud de 1000 msnm, considerando que por cada 1000 m la radiación UV se incrementa 5%, se obtiene la columna (5) considerando cielo despejado.

Puede observarse que ahora el espectro eficaz tiene un valor de 294. Continuando con el ejemplo se supone un factor de nubosidad de 73%, estimándose⁴⁰ entonces que la irradiancia eficaz es para una altitud de 1000 msnm y cielo nublado parcial: $280 \times 1.05 \times 0.73 = 214.6$, es decir un UVI de 9 después de la corrección de altitud y nubosidad.

Esto es así ya que para este ejemplo, las unidades de irradiancia eritemática están expresadas en mili watts por metro cuadrado (mW/m^2) entonces el UVI se calcula dividiendo por 25. La razón de utilizar el número 25 es que para un día típico de cielo despejado al medio día solar la irradiancia eritemática es aproximadamente $250 \text{ mW}/\text{m}^2$ que nos daría un índice de 10 si dividimos por 25.

³⁹ La EPA advierte que estos son valores hipotéticos no son reales factores de ponderación McKinlay-Diffey

⁴⁰ La intensidad UV aumenta aproximadamente un 6% por cada kilómetro de elevación sobre el nivel del mar. Las nubes absorben la radiación UV, lo que reduce la intensidad de los rayos UV a nivel del suelo. Un cielo despejado permiten que el 100% de los rayos UV pase, nubes dispersas permiten el 89%, nublado parcial 73%, y los cielos cubiertos 31%.

⁴¹ El UVI fue originalmente utilizado en Canadá, 10 es para un día típico de verano para ese país

Un número de esas características es de fácil uso para la difusión al público. Para este efecto la ecuación E.3 utilizada es:

$$UVI = \frac{1}{25 \text{ mW/m}^2} \int_{280}^{400} I(\lambda) * \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (\text{E.3.a}) \text{ donde } I(\lambda) \text{ está en } \text{mW/m}^2$$

Retomado nuestro ejemplo dividiendo por 25 obtenemos un valor de 9 (redondeado) y sin nubosidad pronosticada el valor estimado es de 12, es decir 3 unidades menos. Por lo tanto el pronóstico de cielo despejado puede ser considerado como una estimación máxima.

Proceso para el pronóstico de UVI

En términos generales el proceso de pronóstico del UVI requiere lo siguiente:

- a) Pronóstico separado de la columna total de ozono.
- b) La posición geográfica del lugar y el día específico del año.
- c) Un modelo radiativo para la estimación de la radiación UV que llega a superficie a nivel del mar.
- d) El modelo de transferencia radiativa puede contemplar información sobre aerosoles, gases contaminantes y la observación de la radiación UV en la superficie terrestre.
- e) Pronóstico para cielo despejado para estimar UVI máximo.
- f) Ajuste por altitud.
- g) Pronóstico de nubosidad.
- h) Pronóstico con nubosidad.

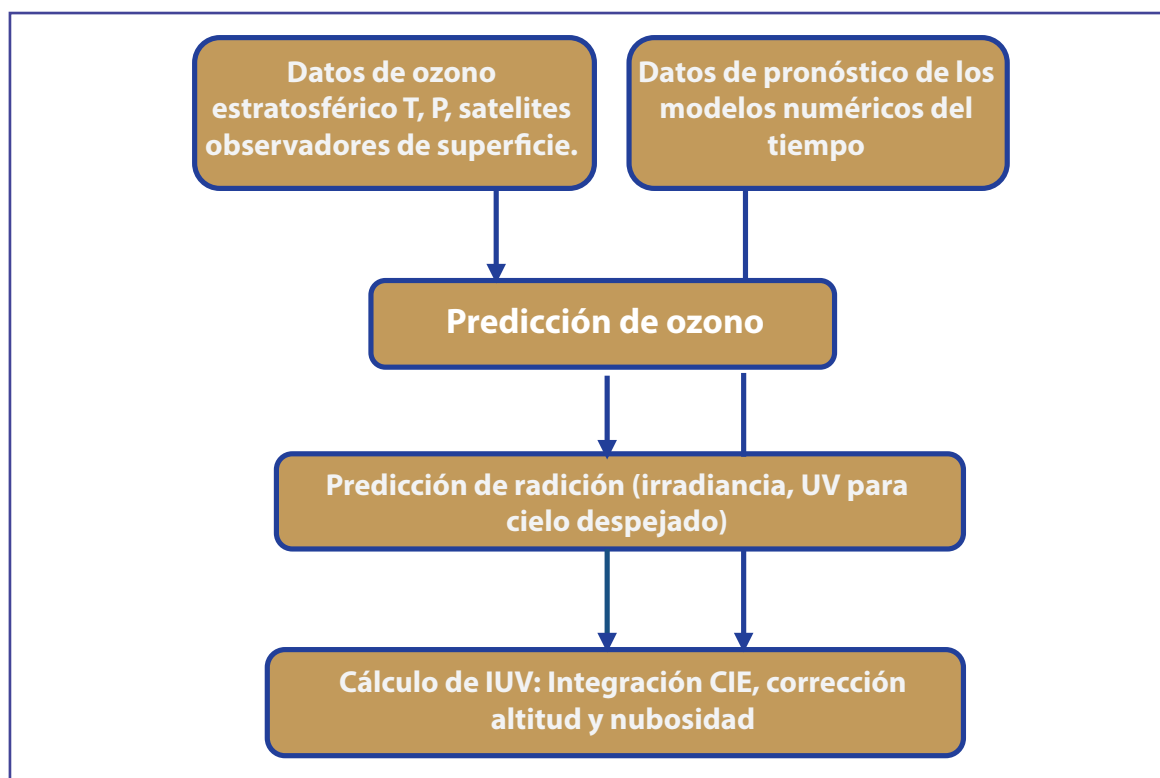
En la Figura 12 se muestra un esquema del proceso descrito, debiéndose resaltar el peso que tiene en el pronóstico la previsión de la columna total de ozono y el ángulo de declinación solar dependiente de la localización y época del año (declinación).

Es de resaltar, para el caso del Perú que el esquema de pronóstico se rige también, en términos generales por estos criterios, sin embargo no se desarrolla en el marco de un proceso que permita una cobertura nacional por falta de automatización vinculada a los modelos de pronóstico del tiempo, a pesar de que se cuenta con amplia información y salidas globales de pronóstico de UVI simplemente poniendo las coordenadas del lugar de interés. Como es el caso de la TEMIS que pone a disposición una página web⁴² que devuelve las previsiones del índice UV y la columna de ozono total para una ubicación especificada por el usuario para el mediodía solar actual y los próximos 6 días para condiciones de cielo despejado y en ausencia de nieve. Los pronósticos se basan en datos de ozono asimilados de GOME-2

⁴² <http://www.temis.nl/uvradiation/nrt/uvindex.php?lon=-71.5369&lat=-16.3988>

En este punto es de resaltar que se cuenta actualmente con pronósticos de ozono total con una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, como uno de los productos del GFS, así mismo en la siguiente dirección pueden obtenerse los datos de UVI (considerando nubosidad pronosticada) a 120 horas de pronóstico en formato GRIB2 a una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$: <ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/hourly/prod/>

Figura 12: Esquema del proceso de pronóstico de UVI⁴³



Incertidumbre de los parámetros más relevantes para el pronóstico de UVI

Un aspecto clave en este análisis es el grado de incertidumbre del pronóstico, aquí recogemos el estudio realizado por Marc Allaart et al (2004) del Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)⁴⁴ quienes mencionan que el cálculo del espectro ultravioleta que alcanza la superficie de la tierra, depende del conocimiento de datos astronómicos y meteorológicos, que en la mayoría de los casos tienen algún grado de incertidumbre que afecta el pronóstico del UVI.

⁴³ Adaptado de "A guide for publication and interpretation of solar UV Index forecasts for the public" prepared by the Working Group 4 of the COST713 Action 'UVB Forecasting'. Karel Vanicek, Thomas Frei, Zenobia Litynska, Alois Schmalwieser, COST713 Action. Brussels, 2000.

⁴⁴ Marc Allaart et al (2004) An empirical model to predict the UV-index based on solar zenith angles and total ozone. Meteorol. Appl. 11, 59–65 (2004)

Específicamente en lo referido a la radiación UV el esquema implica tener en cuenta lo siguiente:

- a) **Nubes:** Los cielos cubiertos reducen el UVI entre 50 al 60 % y cuando ocurre la precipitación la reducción es mayor, en cambio los nublados parciales pueden incrementar o disminuir el UVI. Si sumamos a ello que en muchos lugares existe una alta variabilidad espacial y temporal de la nubosidad, entonces es recomendable presentar al público u pronóstico con cielo despejado y otro con la atenuación debida a la nubosidad pronosticada.
- b) **Albedo:** Para la mayoría de los casos el albedo de la UVB es bastante bajo, salvo para la nieve: La nieve puede seguir reflejando UVB aún en condiciones de cielo parcialmente cubierto con ángulos cenitales altos⁴⁵. El albedo puede llegar a incrementar en un 28% el UVI.
- c) **Altitud:** Se estima debido al incremento de la altitud que el UVI suba entre 0.5% a 0.6 % por cada 1000 metros. Este efecto se debe a la disminución de la atenuación de Rayleigh.
- d) **Ozono total.** El ozono en las regiones tropicales tiene poca variabilidad durante todo el año mientras que en latitudes medias y altas tiene un marcado ciclo anual V.E Fioletov (2008)⁴⁶. A la incertidumbre de 3% del monto de ozono previsto le corresponde una incertidumbre de 4% en el UVI.
- e) **Perfil vertical del ozono:** Como se sabe el ozono junto con el ángulo cenital son factores fundamentales para estimar la irradiancia en superficie. Respecto de su distribución vertical Marc Allaart et al (2004) indican que los modelos de simulación muestran que cuando se cambia de un perfil típico para latitudes medias a otro de latitudes tropicales el UVI se incrementa en 8% manteniendo el ozono total constante (van Weele et al. 2000). Cabe agregar que el incremento (por contaminación) de ozono en superficie puede generar un decrecimiento del UVI 3%.
- f) **Variabilidad espacial:** La presentación mediante isolíneas implica la interpolación del UVI pronosticado por cada punto de grilla. Se estima que esto genera un error de aproximadamente 3%.

⁴⁵ El ángulo cenital solar (SZA en inglés) afecta tanto a la trayectoria óptica a través de la atmósfera y la distribución angular de radiación solar. En realidad, el SZA es el principal factor que afecta la estimación del UVI. Según Jordi Badosa et al (2005) en "Using a Parameterization of a Radiative Transfer Model to Build High-Resolution Maps of Typical Clear-Sky UV Index in Catalonia, Spain" JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY VOLUME 44. AMS 2005

⁴⁶ V.E. Fioletov. Ozone Climatology, Trends, and Substances that Control Ozone. ATMOSPHERE-OCEAN 46 (1) 2008, 39–67 doi:10.3137/ao.460103. Canadian Meteorological and Oceanographic Society 2008

- g) **Distancia tierra sol:** La radiación que llega al tope de la atmósfera tiene cambios que dependen de la distancia entre tierra y sol. La variación es de +/- 3%. Este cambio puede ser incorporado para ser corregido en el modelo de simulación.
- h) **Aerosoles:** Omitir la variabilidad de este parámetro y considerando sólo sus valores típicos en relación con su espesor óptico se introduce un error de alrededor de 5% en la simulación del UVI.

En este punto es de resaltar que si solo consideramos la estimación de UV bajo condiciones de cielo despejado, y utilizando los parámetros ozono total, ángulo cenital y distancia tierra sol, el error máximo esperado es del orden del 10% en ausencia de cobertura de nieve en superficie. Marc Allaart et al (2004).

En la Tabla 9, tomada de ese estudio, se describen algunas estimaciones del grado de incertidumbre por parámetro.

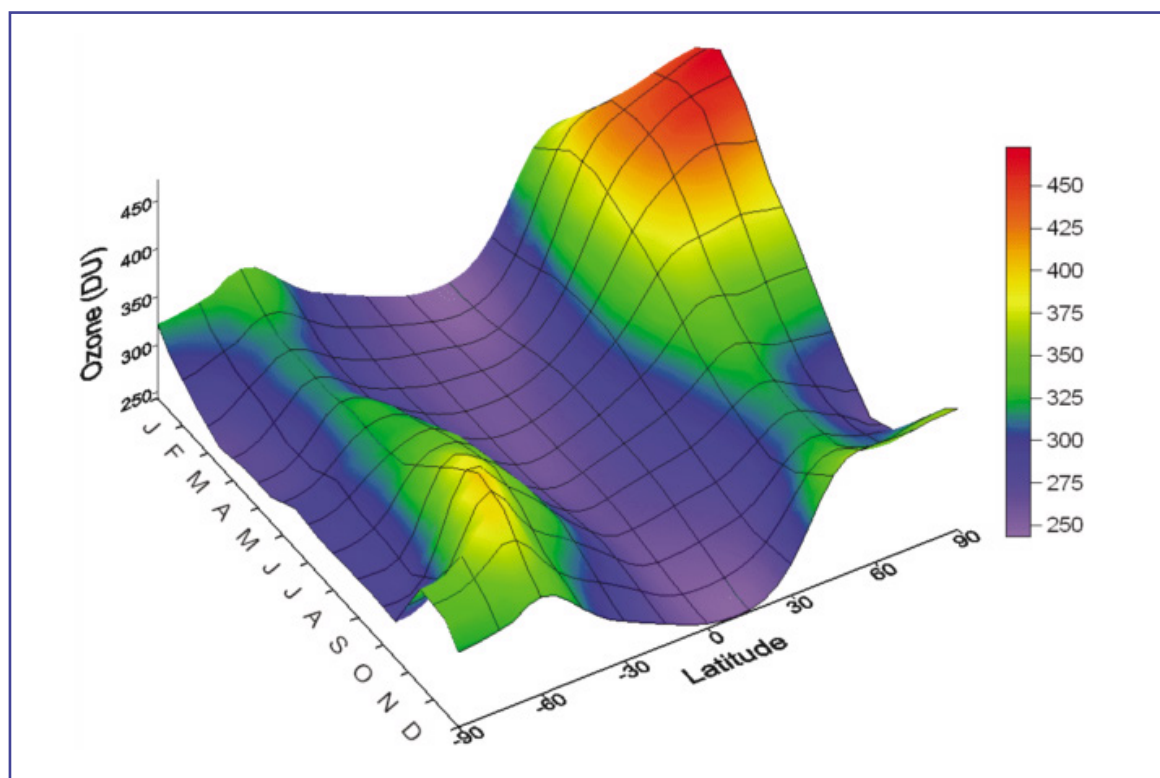
Tabla 9: Estimación aproximada del aporte por parámetro a la incertidumbre del pronóstico del UVI

	Parámetro	Incertidumbre en el UVI
1	Cobertura de nubes y propiedades	> 50%
2	Albedo (nieve)	28%
3	Altitud (1km)	5%
4	Ozono total (3%)	4%
5	Perfil del Ozono	8%
6	Variabilidad espacial	3%
7	Distancia de la tierra al sol	3%
8	Propiedades de los aerosoles	5%

Fuente: Marc Allaart et al (2004)

Otro aspecto a resaltar de la Tabla 9, es que la mayor incertidumbre en la estimación del UVI, está provocada por la estimación de la cobertura nubosa y el albedo (suman juntas el 80%), mientras que la incertidumbre de la estimación del UVI considerando el ozono total es del orden de 4%, debiéndose destacar la menor variabilidad del ozono en los trópicos (ver Figura 13)

Figura 13: Ozono total mensual (UD) en función de la latitud (período 1964–1980)



Tomado de V.E Fioletov (2008) ⁴⁷ .

El efecto de la Longitud geográfica y la hora solar

Hasta este momento no habíamos abordado el hecho de que para el mapa pronosticado de UVI máximo se requiere tomar en cuenta la hora solar y su relación con la hora local que depende de la longitud. Evidentemente el paso del sol por el cenit no es simultáneo por lo que el UVI máximo tomado como simultáneo es una aproximación.

Para ver la implicancia de este efecto debemos considerar la ecuación del tiempo o la ecuación que mide la diferencia entre el movimiento aparente del sol y su movimiento medio. Las ecuaciones han sido tomadas de la página web de la NOAA^{48, 49} ,

⁴⁷ V.E. Fioletov. Ozone Climatology, Trends, and Substances that Control Ozone. ATMOSPHERE-OCEAN 46

⁴⁸ (1) 2008, 39–67 doi:10.3137/ao.460103. Canadian Meteorological and Oceanographic Society 2008

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>

⁴⁹ eqtime es la ecuación del tiempo (E.7) y decl es la declinación (E.8)

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} * (\text{day_of_year} - 1 + \frac{\text{hour} - 12}{24}) \quad \text{E.10}$$

$$\text{eqtime} = 229.18 * (0.000075 + 0.001868 \cos \gamma - 0.032077 \sin \gamma - 0.014615 \cos 2\gamma - 0.040849 \sin 2\gamma) \quad \text{E.11}$$

$$\text{decl} = 0.006918 - 0.399912 \cos \gamma + 0.070257 \sin \gamma - 0.006758 \cos 2\gamma + 0.000907 \sin 2\gamma - 0.002697 \cos 3\gamma + 0.00148 \sin 3\gamma \quad \text{E.12}$$

Un aspecto a tener en cuenta para la elaboración de un mapa de UVI máximo, es el efecto de considerar el día medio solar. Para evaluar este efecto calculares la hora local correspondiente a las diferentes longitudes geográficas

Tabla 10: Cálculo de UVI para la hora solar⁵⁰ (hora local 12 del 14/10/2016)

Longitud	Hora solar	ángulo cenital solar en O°	Cos (SZA)	UVI
-80.0	12.09	8.34	0.98942	13.2641
-79.0	12.02	8.24	0.98967	13.2721
-78.0	11.96	8.26	0.98963	13.2708
-77.0	11.89	8.39	0.98930	13.2602
-76.0	11.82	8.63	0.98868	13.2403
-75.0	11.76	8.97	0.98777	13.2111
-74.0	11.69	9.40	0.98657	13.1727
-73.0	11.62	9.91	0.98509	13.1252
-72.0	11.56	10.48	0.98332	13.0686
-71.0	11.49	11.11	0.98126	13.0030
-70.0	11.42	11.79	0.97891	12.9285
-69.0	11.36	12.51	0.97628	12.8452

⁵⁰ Elaboración propia en base a Madronich (2007) y E.5, E.6, E.7 y E.8

Esto quiere decir que para este día a una longitud de 80 W (- 80°) el sol pasa por el cenit a las 12 h 05 m hora local, a la longitud de 75 W (- 75°) el sol pasa por el cenit a las 11 h 45 m hora local y a una longitud de 70 W (- 70°) el sol pasa por el cenit a las 11 h 25 m hora local.

Variación estacional del UVI a ozono constante

Para evaluar el efecto estacional de la variación del ángulo cenital solar sobre el cálculo del UVI, se ha estimado el UVI para los días aproximados correspondientes a los solsticios y equinoccios, a ozono constante con el fin de que se pueda destacar el efecto de la latitud.

Es decir en vez de un valor contante para el ozono se utilizaron estos valores para incluir el efecto estacional en los cálculos realizados para el caso anterior. Aquí se estimó la variación del UVI con la latitud entre -18° y 0°. En la Figura 14 se presenta un gráfico que muestra la variación de UVI utilizando valores típicos de ozono de la estación Marcapomacocha⁵¹, para verano (244 UD), otoño (243 UD), invierno (240 UD) y primavera (254 UD)⁵².

Se puede observar que, salvo el “verano” el UVI se incrementa conforme nos acercamos al ecuador, con los menores valores en invierno dado el ángulo cenital solar, sin embargo debe tenerse en cuenta que las correcciones por altitud y nubosidad no están incluidas en este cálculo como tampoco la variación latitudinal del ozono total. En este ejemplo hemos asumido valores de ozono constante vinculados a Marcapomacocha.

De estos gráficos se concluye que las variaciones en el UVI por efecto de considerar latitud llevan a diferencias de hasta 5 UVI en invierno, entre el extremo sur y norte del territorio mientras que para el “verano” es cercano a 3 UVI con una inversión en el signo del gradiente de UVI (mayor en el sur que en el norte. Los valores del UVI en “otoño” y “primavera” son altos durante todas las latitudes y crecientes hacia el ecuador. Sin duda el efecto del ángulo cenital solar es decisivo para este comportamiento.

Llama la atención los altos valores del índice UVI que adquiriría para la zona del altiplano (por ejemplo Puno está a 15.8° Sur), aplicando para el 21 de diciembre anterior sin nubosidad para esa latitud, se obtiene un UVI de 19 considerando una altitud de 3810 msnm, es decir, el UVI incrementa por corrección de altitud⁵³, 3 unidades más.

Veamos ahora un caso en que contamos con información pronosticada de la NOAA de la columna de ozono en UD⁵⁴ (Figura 15)

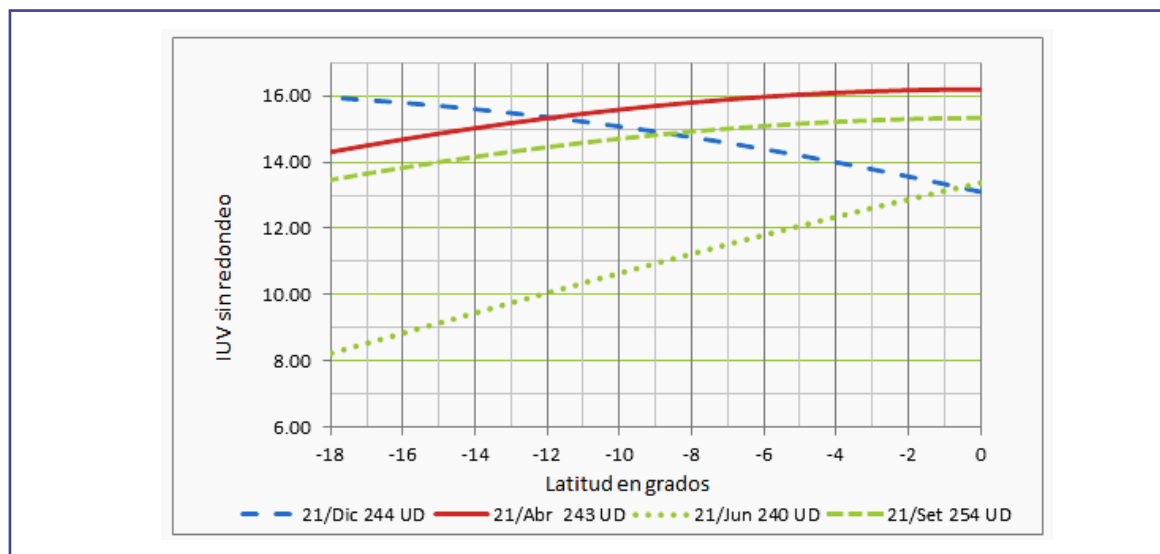
⁵¹ La estación VAG Marcapomacocha se encuentra en las coordenadas -11.4044, -76.3251 a una altitud de 4500 msnm

⁵² Datos proporcionados por el SENAMHI

⁵³ Incrementando 5% cada 1000 metros

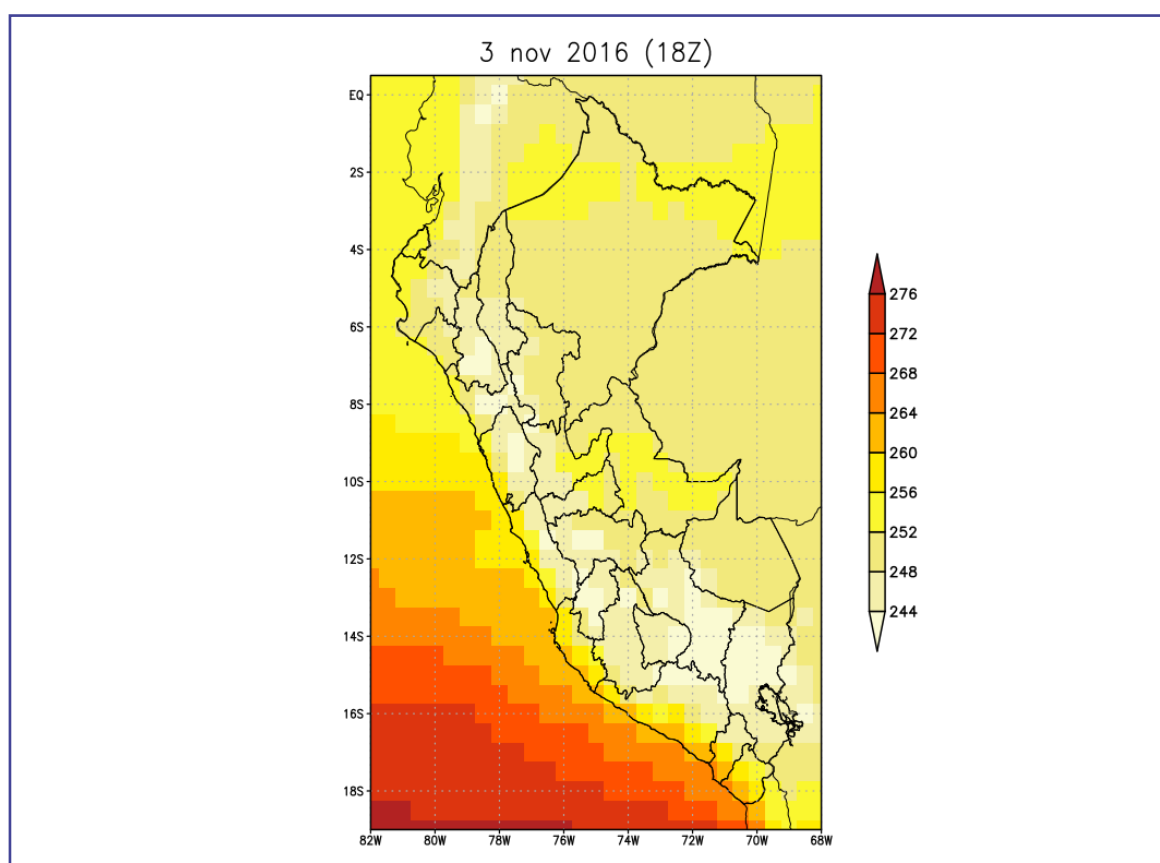
⁵⁴ 1 UD = 2.6867 x 10²⁰ moléculas/m² = 4.4615 x 10⁻⁴ MOL/m² = 2.1415 x 10⁻⁵ kilogramos de ozono/m²

Figura 14: Variación del UVI según latitud considerando valores típicos de ozono (período 2000 - 2015) en la Estación VAG - Marcapomacocha



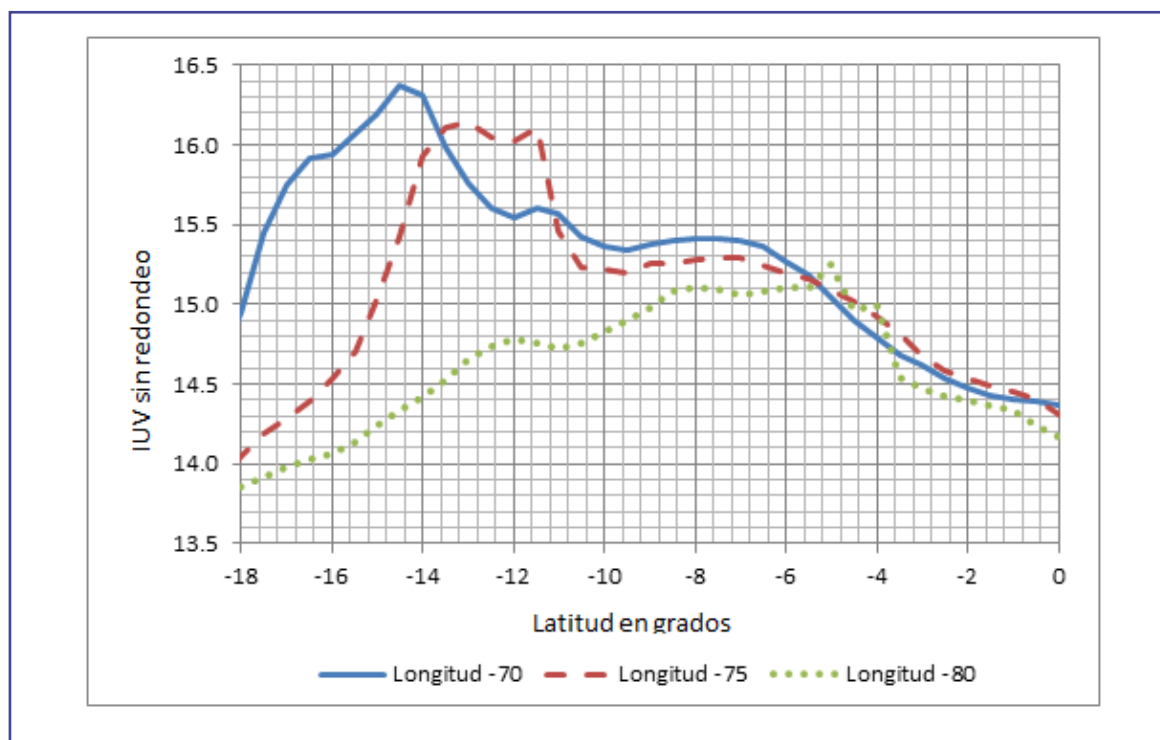
En línea continua: otoño, en puntos: invierno, en discontinua pequeña: primavera y discontinua grande: verano. Hora solar 12:00

Figura 15a: Pronóstico de columna de ozono en UD para la 1 pm (GFS NOAA)



Con los datos grillados vamos a realizar un corte de los valores de ozono pronosticados para las longitudes geográficas -70, -75 y -80 y usando la fórmula de Madronich vamos a estimar el UVI pronosticado y haremos un gráfico del corte longitudinal. Figura 16

Figura 15b: Pronóstico para cielo despejado de UVI para la 1 pm del 3/11/2016 (NOAA), corte longitudinal



En este ejemplo puede observarse que los máximos de UVI se encuentran al sur del ecuador, para las coordenadas 15° sur y 70° oeste (departamento de Puno) tenemos un UVI mayor a 16, para las coordenadas 12° sur 75° oeste (aproximadamente Huancayo) un UVI muy cercano a 16 y para las coordenadas 5° sur y 80° oeste un UVI mayor a 15. En todos los casos para cielo despejado estos valores son todos muy altos.

Climatología del índice UV para el Perú

En base a la parametrización de Allart se publican en la página web⁵⁵ de TEMIS datos climáticos para el mundo. Hemos procesado esta información para el Perú para obtener las climatologías para cielo despejado para el período 1995 - 2003. Figura 16 (verano), Figura 17 (otoño), Figura 18 (invierno) y Figuras 19 (primavera).

Tal como era de esperar de acuerdo a lo mostrado anteriormente el comportamiento del UVI con cielo despejado excede largamente los valores reportados para latitudes altas y medias, destacando el enorme impacto sobre la sierra central y sur del país, con un máximo en el trimestre enero - febrero - marzo. Pero en todos los casos los valores para cielo despejado exceden la escala internacional.

⁵⁵ <http://www.temis.nl/uvradiation/UVarchive.html>

Figura 16: UVI potencial para el verano (cielo despejado)

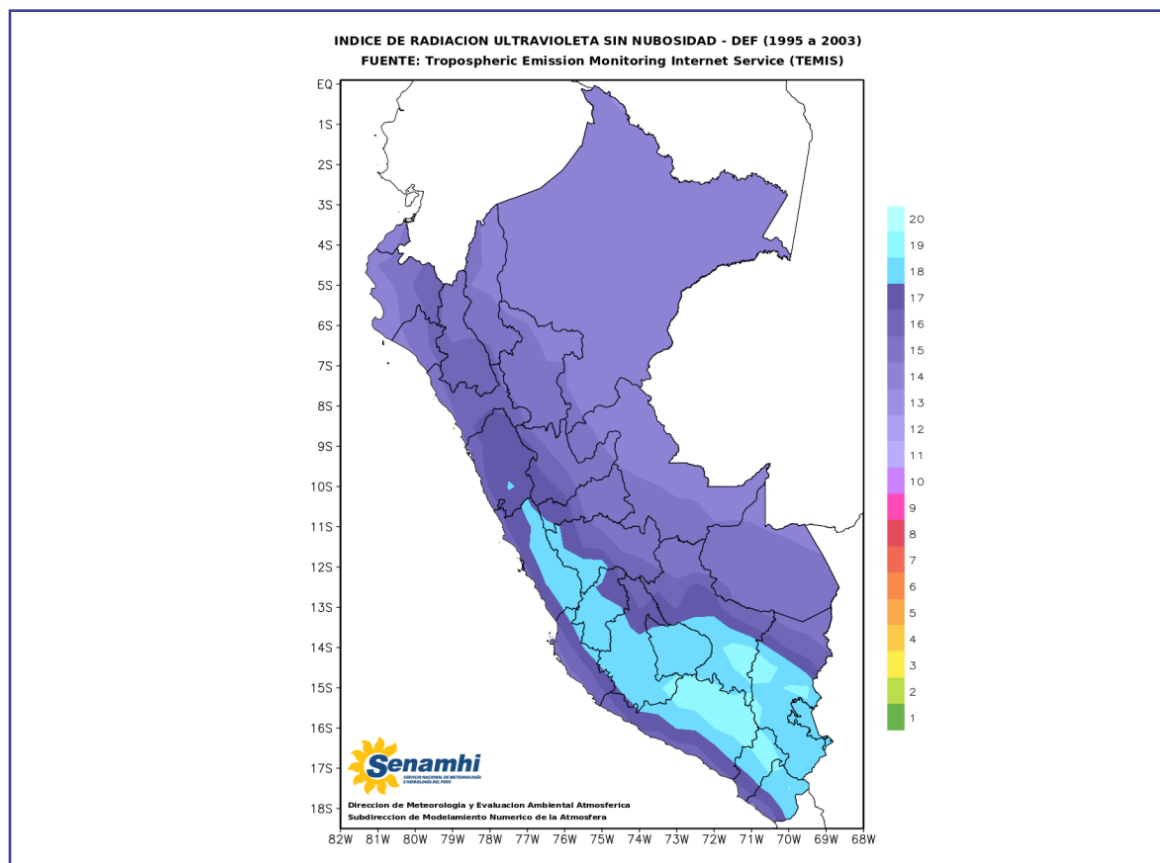


Figura 17: UVI potencial para el otoño (cielo despejado)

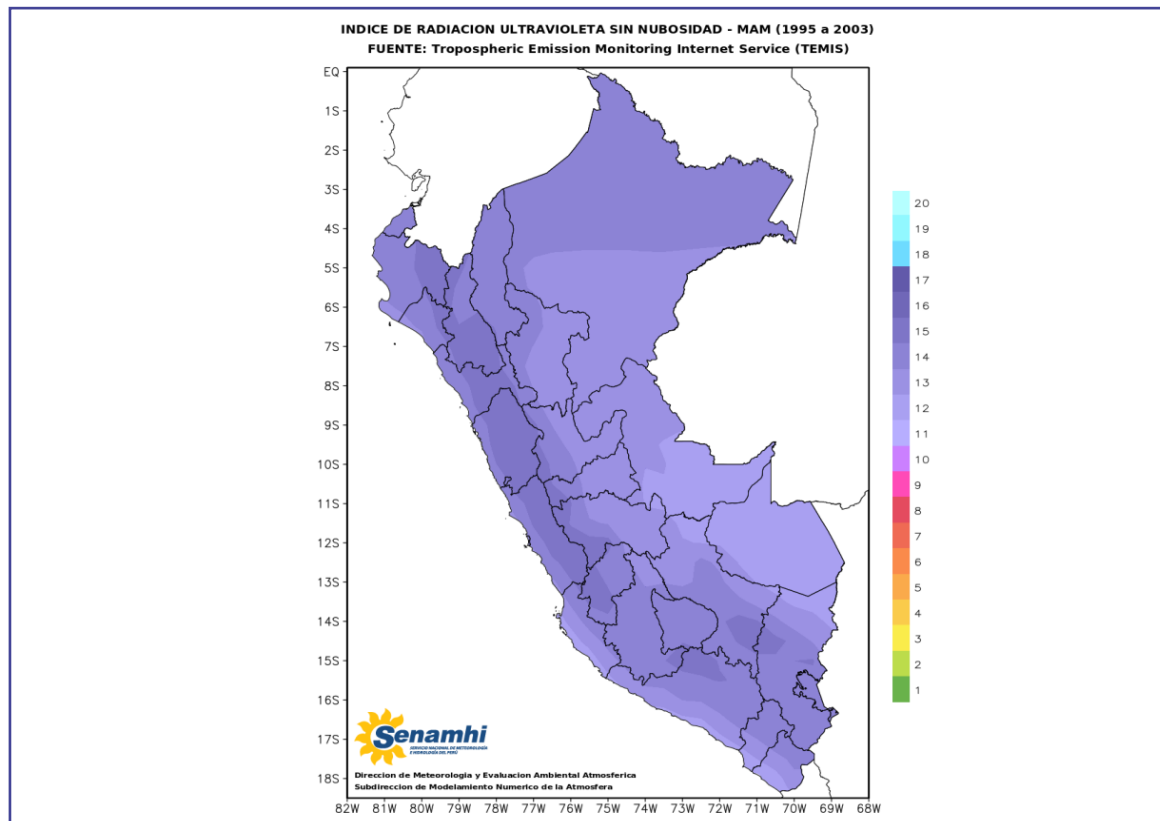


Figura 18: UVI potencial para el invierno (cielo despejado)

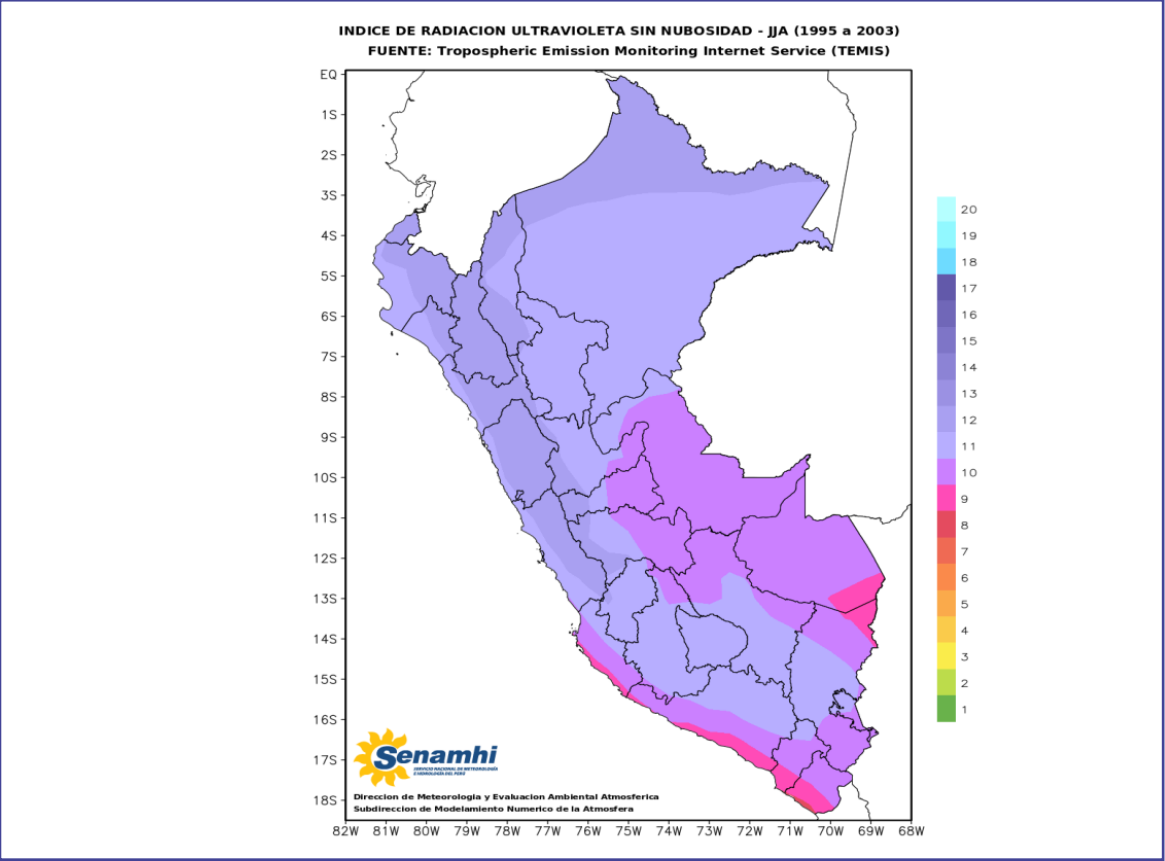
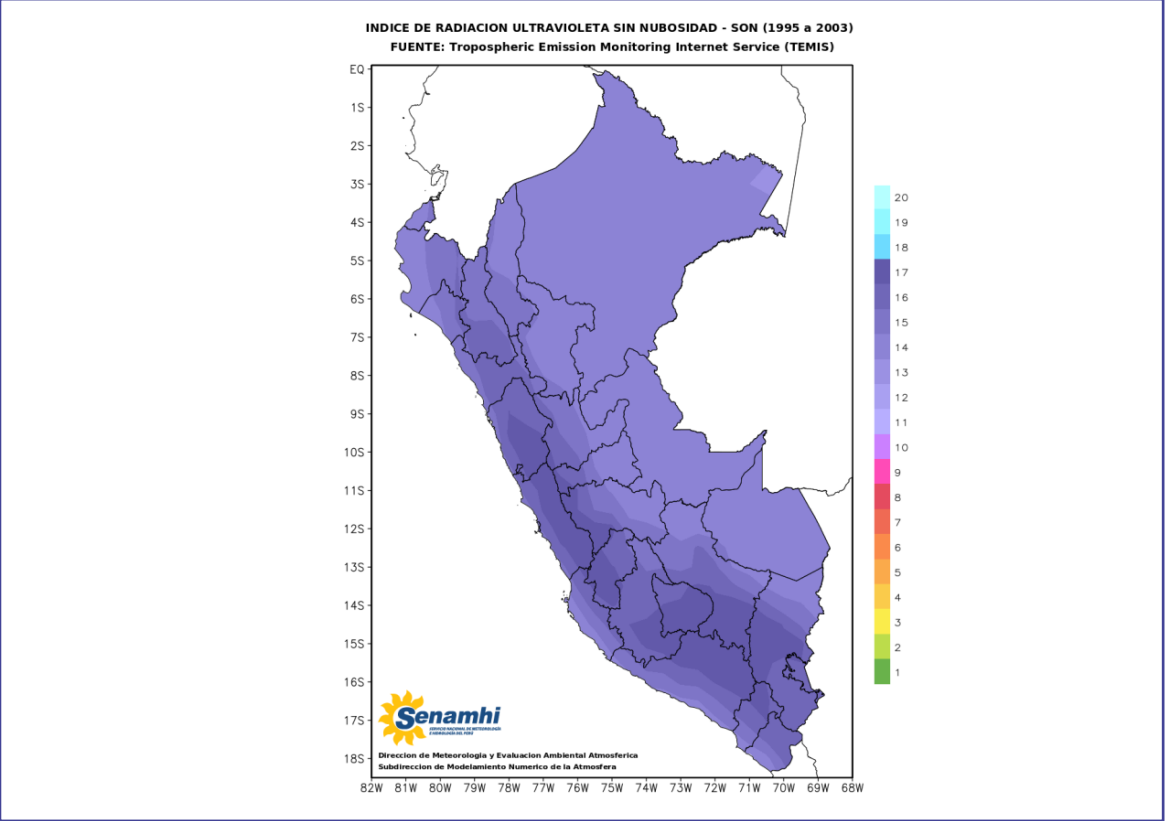
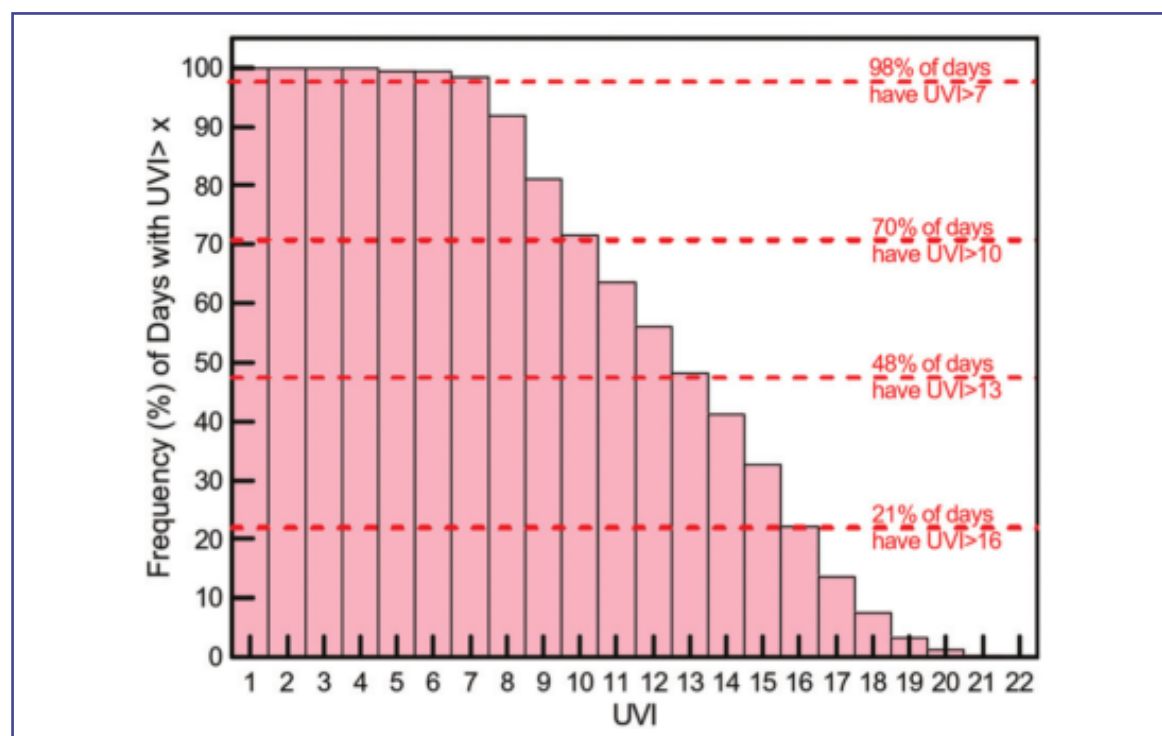


Figura 19: UVI potencial para la primavera (cielo despejado)



Esto nos lleva a la discusión de la pertinencia de la escala internacional utilizada por la OMS que indica en forma genérica UVI mayores a 11 como extremadamente alto. De hecho, Francesco Zaratti et al (2014) mencionan que la distribución acumulada de los UVI máximos utilizando un espectrofotómetro Brewer en La Paz Bolivia (16.5 Sur, 68.1 Oeste, altitud: 3420 msnm, para el período 2008 - 2012) muestra que en el 70% de los días el UVI excede el valor de 10, es decir de acuerdo a la clasificación de la OMS corresponde a extremadamente alto. Figura 20

Figura 20: Distribución acumulada de UVI máximo para La Paz Bolivia para el período 2008 - 2012)



Tomado de Zaratti et al. (2014)

Los autores por ello sugieren que manteniendo la escala numérica del UVI no terminarla en +11 sino extenderla ya que puede llegarse a medir 25. De hecho esto ya lo viene realizando el Servicio Meteorológico de Finlandia como puede apreciarse en sus salidas de su pronóstico global⁵⁶. La escala de colores en este caso es una extensión de la escala de la OMS (Figura 19). La escala propuesta por Zaratti et al (2014) se ha puesto debajo de la escala del FMI y también la del Servicio Meteorológico Nacional Argentino, muy parecido al del FMI.

⁵⁶ <http://en.ilmatieenlaitos.fi/uv-index>

Así mismo recomiendan no centrarse en los colores sino en el valor numérico, y acompañar ese valor con su efecto según el tipo de piel, es decir las campañas de comunicación, podrían lograr que las personas asocien el UVI con su tipo de piel, el tiempo que podrían estar expuestos sin protección no solo respecto de su piel sino de sus ojos.

Como mencionan Zaratti et al (2014) casi el 90% de la población del mundo está expuesta a UVI mayores a 10, una simple revisión de la Figura 21 corrobora lo que se muestra en la Tabla 10 elaborada por los autores mencionados.

Figura 21: Pronóstico de UVI máximo para el mundo, tomado del FMI

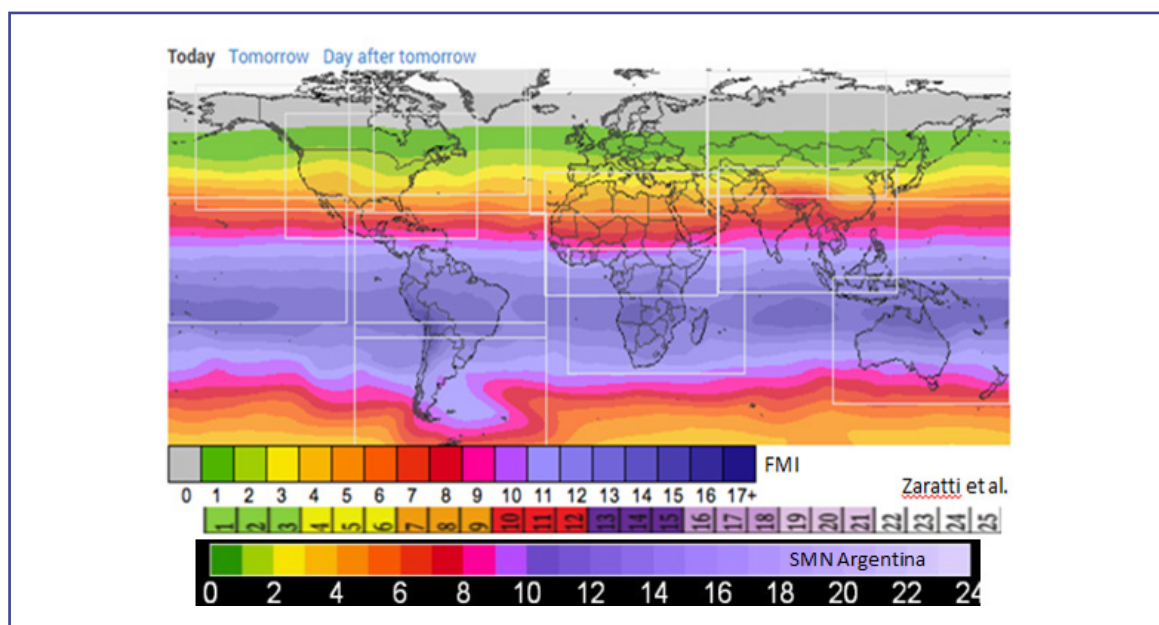


Tabla 11: Superficie y población afectada por UVI mayor a 10

UVI	Área global (%)	Población(%) referencia año 2000
10	78.400	89.100
11	74.100	85.000
12	66.900	74.800
13	61.500	62.400
14	51.200	37.700
15	41.200	27.100
16	21.300	12.800
17	5.500	4.800
18	0.640	1.390
19	0.360	0.780
20	0.220	0.350
21	0.190	0.280
22	0.078	0.135
23	0.029	0.085
24	0.003	0.011

Es importante mencionar que bajo estas consideraciones incluso los autores que cuestionan el índice proponen mantener los colores de la escala internacional (Tabla 11), pero sin limitarse a 11.






















Tabla 12: UVI escala de colores y categoría internacional de exposición

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUUV
BAJA	<2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11 +

Tomado de OMS (2003)

Cabe destacar que el SENAMHI actualmente presenta en sus informes una escala y colores diferentes a los establecidos por la OMS. Ver Tabla 12




















Tabla 13: Escala utilizada por el SENAMHI hasta noviembre 2016

Valor del Índice	Nivel de Riesgo
1 – 2 	Mínimo
3 – 5  	Bajo
6 – 8    	Moderado
9 – 11     	Alto
12 – 14     	Muy Alto
14 +     	Extremo

Esta escala de colores no es ni práctica ni conveniente a efectos de realizar una comparación internacional del UVI, sobre todo si tomamos en cuenta que el cálculo del índice UV es el mismo, ya que utiliza el mismo espectro de acción eritemática que el usado internacionalmente (OMS, 2003).

En tal sentido es pertinente seguir esa sugerencia tal como lo hacen otros centros meteorológicos como el SMN de Argentina o el CPTC de Brasil, en tal sentido se propone la escala de colores descrita en la Tabla 14

Tabla 14: Escala de colores a ser usada por el SENAMHI para el pronóstico de UVI

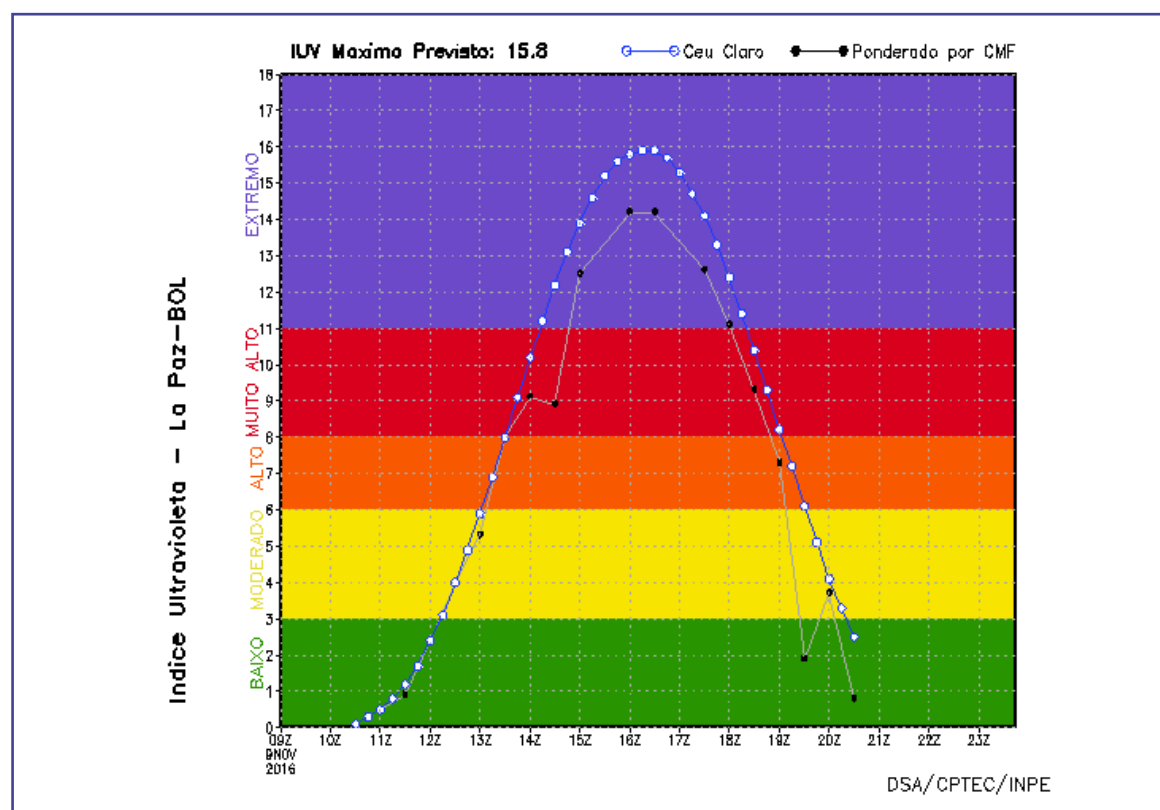
N°		R	G	B
1		43	146	0
2		160	206	0
3		247	228	0
4		248	182	0
5		248	135	0
6		248	89	0
7		232	44	14
8		216	0	29
9		255	0	153
10		181	76	255
11		153	140	255
12		133	120	235
13		113	100	215
14		93	80	195
15		73	60	175
16		53	40	155
17		33	20	135
18		50	204	255
19		100	245	255
20		150	255	255

Esta tabla considera 20 unidades, de las cuales las 11 primeras son las utilizadas por la OMM, de la 12 a 17 son las utilizadas por el servicio meteorológico de Finlandia y de la 18 a 20 son propuestas en esta Nota Técnica.

Categoría de exposición y nivel de riesgo

Puede apreciarse que de acuerdo a la OMS - OMM, el índice de radiación ultravioleta se asocia a una categoría de exposición y no hace mención a niveles de riesgo, si bien ambos están relacionados el SENAMHI ha venido explicando constantemente que riesgo no es lo mismo que peligro, El riesgo es la probabilidad de que ocurra un efecto negativo, pero ser afectados además de la existencia del peligro debemos estar expuestos a ese peligro, justamente el UVI mide la irradiancia solar eritemática a la que estaríamos expuestos, es decir el UVI es una categoría de exposición asociada al tipo de piel. Por ello debemos seguir el criterio de la OMM y la OMS y como en la Figura 22 adoptar esas categorías.

Figura 22: Pronóstico de UVI máximo para La Paz Bolivia para el 9/11/2016 (CPTEC)⁵⁷



Sobre el tiempo que puede estar expuesta una persona la OMS desaconseja que se haga campañas donde se incluyan la tolerancia a las quemaduras solares en función del tiempo de exposición, justamente eso es lo que hace el SENAMHI en sus recomendaciones al público.

La razón para que la OMM y la OMS mencionen la inconveniencia de indicar tiempos de exposición antes de que se originen quemaduras en la piel, radica en que “aunque el objetivo prioritario de la prevención primaria del cáncer de piel es evitar las quemaduras solares, la exposición acumulada a la radiación UV desempeña un papel primordial en el desarrollo de los cáncer de la piel y acentúa los daños oculares y al sistema inmunológico. Es decir se está obviando en el mensaje relacionado con los tiempos de tolerancia el efecto acumulado de la RUV.

Por lo tanto el SENAMHI⁵⁷ está obviando esta recomendación de la OMM y la OMS al describir como se aprecia en la tabla 15 los tiempos de exposición máxima sin protección solar.

⁵⁷ <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0420>

Tabla 15: Página Web del SENAMHI tiempos de exposición máxima

Sábado 19 de Noviembre 2016 (Indices calculados para el medio día)									
Lima	Piura	Tacna	Cajamarca	Arequipa	Cusco	Ica	Puno	Moquegua	Junín (Prov. Yauli)
INDICE UV 11	INDICE UV 12	INDICE UV 10	INDICE UV 12	INDICE UV 13	INDICE UV 12	INDICE UV 11	INDICE UV 14	INDICE UV 12	INDICE UV 13
Alto	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Tiempo de exposición máxima directa al sol sin protector solar									
<div>  Personas de Piel Blanca  Personas de Piel Trigueña  Personas de Piel Oscura </div>									
15-20 min.	10-15 min.	15-20 min.	10-15 min.	10-15 min.	10-15 min.	15-20 min.	10-15 min.	10-15 min.	10-15 min.
25-30 min.	15-20 min.	25-30 min.	15-20 min.	15-20 min.	15-20 min.	25-30 min.	15-20 min.	15-20 min.	15-20 min.
35-40 min.	20-30 min.	35-40 min.	20-30 min.	20-30 min.	20-30 min.	35-40 min.	20-30 min.	20-30 min.	20-30 min.

Fuente: página web del SENAMHI

Cabe agregar que en un estudio realizado para México⁵⁸, (Castanedo et al. 2012), se menciona que el daño continuo pero intermitente a “dosis suberitematógenas” podría suceder en la población de piel morena oscura tras 18 min de exponerse al sol si el índice UV está en 10. Los autores resaltan la importancia de que una persona de fototipo⁵⁹ V (que tienen la piel oscura, al igual que los ojos, y el pelo de color negro).

El peligro aquí es que estas personas no perciben irritación UV, sin embargo esta dosis acumulada originará cambios degenerativos que se expresarán posteriormente. En otro ejemplo, estos autores si el índice UV es 13, es probable que una persona mexicana de piel blanca sufra quemadura si se expone de 18-22 min al sol. Sin embargo, “cambios cutáneos degenerativos podrían desarrollarse antes de 8 min de exposición solar”.

Esto no pretende cuestionar la validez de las investigaciones sobre tiempos máximos de exposición que justamente han permitido poner a disposición de la ciudadanía un índice sencillo de explicar.

La siguiente figura, puede servir de guía para conocer el tiempo mínimo en que la exposición al sol que causará un eritema o enrojecimiento sensible de la piel (Minimal Erythemal Dose, MED) para diferentes niveles de UVI y para cada tipo de piel. Tiempo en minutos necesarios para acumular una dosis de 1 MED en función del UVI y del tipo de piel, referidos a la tabla 10 se puede observar en la Figura 23.

⁵⁸ http://www.anmm.org.mx/GMM/2012/n3/GMM_148_2012_3_243-247.pdf

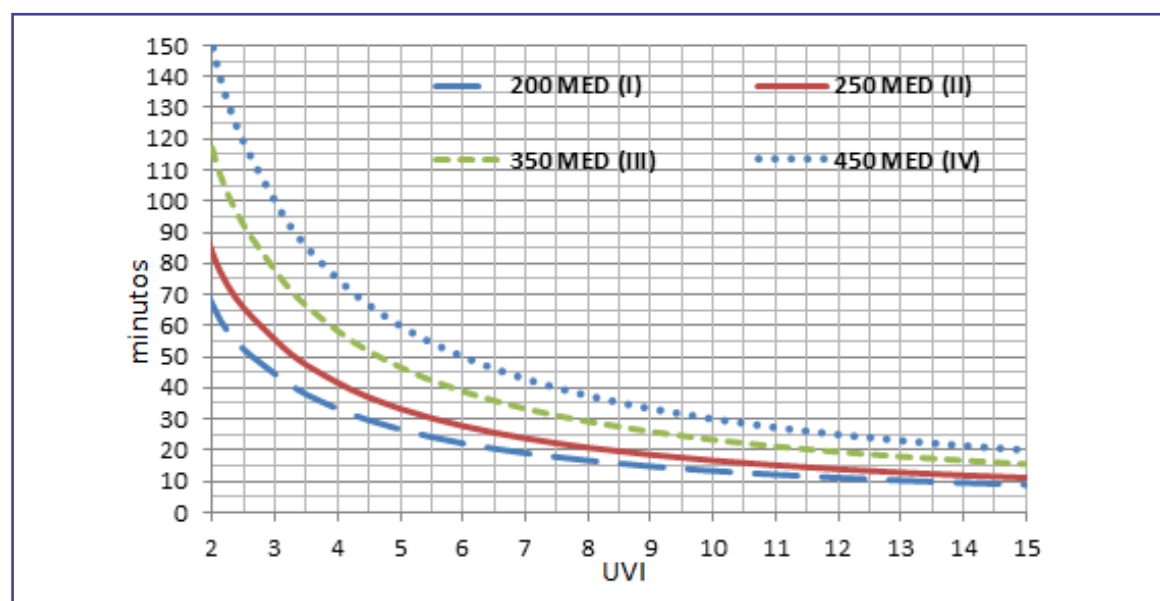
⁵⁹ Fototipo es la capacidad de la piel para asimilar la radiación solar. Su clasificación oscila entre I y VI según la escala Fitzpatrick, una clasificación numérica para el color de piel desarrollado en 1975 por Thomas B. Fitzpatrick.

Tabla 16: Sensibilidad a las quemaduras solares por tipo de piel⁶⁰

Tipo de Piel	Se broncea	Se quema	MED en J/m ²	Color de pelo	Color de ojos
I	Nunca	Siempre	200	Pelirrojo	Azul
II	A veces	A veces	250	Rubio	Azul /verde
III	Siempre	Raramente	350	Castaño	Gris / Marrón
IV	Siempre	Nunca	450	Negro	Marrón

1MED = 210 J/m²

Figura 23: Tiempo de exposición en minutos asociado a MED según tipo de piel



Para construir el gráfico anterior se tomaron los datos de la Tabla 10 que asocian la Dosis Mínima de Eritema (MED) con cuatro tipos de piel. El cálculo es muy sencillo el tiempo en minutos, se obtiene, teniendo en cuenta que relaciona el UVI, el cual se puede expresar en MED por unidad de tiempo entonces⁶¹

$$MED \left(\frac{J}{m^2} \right) \text{ entonces: } T(\text{minutos}) \sim \frac{MED(\text{tipo de piel})}{UVI} \quad E.13$$

⁶⁰ El tipo de piel de Fitzpatrick está predominantemente determinado por la pigmentación de la piel. En cuanto a los valores de las MED la literatura muestra que hay una variabilidad entre sujetos del mismo fototipo

⁶¹ UVI CALCULATION ANALYSIS / Donald L. Smith A B C D (Copyright UVR Research Institute 2/02) http://meteo.lcd.lu/uvic_calculator/02-UVI-Calculations-2-7.PDF.

En la figura anterior puede verse que para un UVI=3, el tiempo necesario para acumular un MED en una persona de piel tipo IV es casi el doble que para una persona de piel tipo II. Así mismo para una persona de piel tipo II el tiempo de exposición para un UVI 4 es del orden de 40 minutos, mientras que para UVI 10 es de 15 minutos. En cambio para para UVI 10 una piel tipo IV requiere 40 minutos.

Sin embargo es pertinente indicar que la literatura científica llama la atención sobre el hecho experimental de que existe un solapamiento muy considerable de MED entre los tipos de piel, lo que demuestra que MED es un muy pobre indicador del tipo de piel (G.I. Harrison y A.R. Young 2002).





Pronóstico de UVI, ajuste de altitud y nubosidad

Como se mencionara anteriormente (recordar Figura 11), luego del pronóstico del UVI para cielo despejado asociado primordialmente al ángulo solar cenital (SZA) y la cantidad de ozono total (UD) se debe proceder al ajuste del UVI por altitud y nubosidad (Tabla 17), aquí seguiremos los criterios de Vanizec et al. (2000) que plantean la siguiente ecuación para este ajuste:

$$UVI = UVI_0 * CMF * (1 + 0.08 * \Delta H) \quad E.14$$

Donde: CMF: Factor de modificación de nube y ΔH : Altitud⁶² en Km.

Tabla 17: Ajuste por nubosidad

Cantidad de Nubes				
Nubes	Despejado o con nubes muy dispersas	Brillo Solar con nubosidad	Resplandor	Cielo cubierto
Altas	1	1	1	0.9
Medias	1	1	08	0.5
Bajas	1	0.8	05	0.2

Otros fenómenos

Nieblas				0.4
Lluvias				0.2

⁶² EUVI CALCULATION ANALYSIS / Donald L. Smith A B C D (Copyright UVR Research Institute 2/02) http://meteo.lcd.lu/uvi_calculator/02-UVI-Calculations-2-7.PDF.

Ajuste por altitud

En este punto haremos una breve discusión sobre el ajuste de altitud, para este efecto utilizaremos el estudio realizado por Sola, Y., et al. (2008)⁶³

En este estudio se muestra que hay una “alta dependencia del efecto de altitud (AE) con la longitud de onda, el ángulo cenital solar, y los aerosoles. En la banda UVA (320-400 nm), la AE osciló entre el 6-8% por cada 1000 m al medio día, mientras que para la banda UVB (280-320 nm) alcanzó el 7-11% por cada 1000 m, mientras que la irradiancia ponderada eritemáticamente (base del UVI) varió de 11 a 14% por cada 1000 m, entre las estaciones más bajas y más altas en base a mediciones espectrales. Es decir evaluar el efecto de altitud es evaluar el comportamiento del espesor óptico de la atmósfera con la altura.

Krotkov et al. 1998 citado por Sola et al, explican en su trabajo a efectos de medir las diferencias entre las mediciones en superficie y las obtenidas por satélites que “en algunas partes de la Tierra, los aerosoles pueden reducir el flujo UV en la superficie en más del 50%”. El impacto de los aerosoles es importante y se reflejan en las estimaciones realizadas para calcular el efecto de altitud sobre las estimaciones del UVI, de acuerdo a Krotkov et al. 1998.

Es de resaltar que esta investigación demuestra que para una atmósfera libre de nubes y aerosoles, el flujo de UV a 300 nm, aumenta aproximadamente un 10% por cada reducción de presión de 100 hPa⁶⁴, siendo “el límite inferior para la atmósfera real”, 5%, a 330 nm como límite teórico. Aquí puede ser interesante destacar que esta tasa de crecimiento con fines prácticos se lleva a metros resultando una tasa de 5%/1000m.

El UVI que nosotros estamos calculando es justamente considerando cielo despejado y sin contaminación, es decir es de esperar incluso valores más altos que los encontrados en el estudio de Sola et al, para la tasa de crecimiento de UVI cada 1000 m pero se debe tener a su vez en cuenta que el UVI con presencia de aerosoles es menor (sobre todo si comparamos) mediciones realizadas por instrumentos ubicados en ciudades.

Por ejemplo el equipo Biometer del SENAMHI ubicado en Arequipa está a pocos metros de una avenida de alto tránsito, la aplicación de la tasa del 5% cada 1000 metros en este caso subestimaría lo que estaría ocurriendo en un ámbito rural 1000 metros más arriba de la ciudad de Arequipa.

Por ello se justifica utilizar la tasa de crecimiento de 5% cada 1000 m utilizadas por Allaart et al. (2004), cuando se parte de pronosticar bajo condiciones de cielo despejado y sin contaminación el UVI llevarlo a nivel del mar y luego hacer el ajuste con 5%.

⁶³ Altitude effect in UV radiation during the Evaluation of the Effects of Elevation and Aerosols on the Ultraviolet Radiation 2002 (VELETA-2002) field campaign, publicado en el JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JD009742/epdf>

⁶⁴ El cambio en el flujo de radiación UV entre dos niveles diferentes de la atmósfera, es proporcional a las diferencias de presión entre esos niveles.

Sin embargo a partir de las mediciones en superficie se deben realizar más investigaciones que permitan evaluar el efecto de la altitud considerando aerosoles y realizar los ajustes en el UVI pronosticado. En este punto la red de observación de la radiación UV jugará en papel importante.

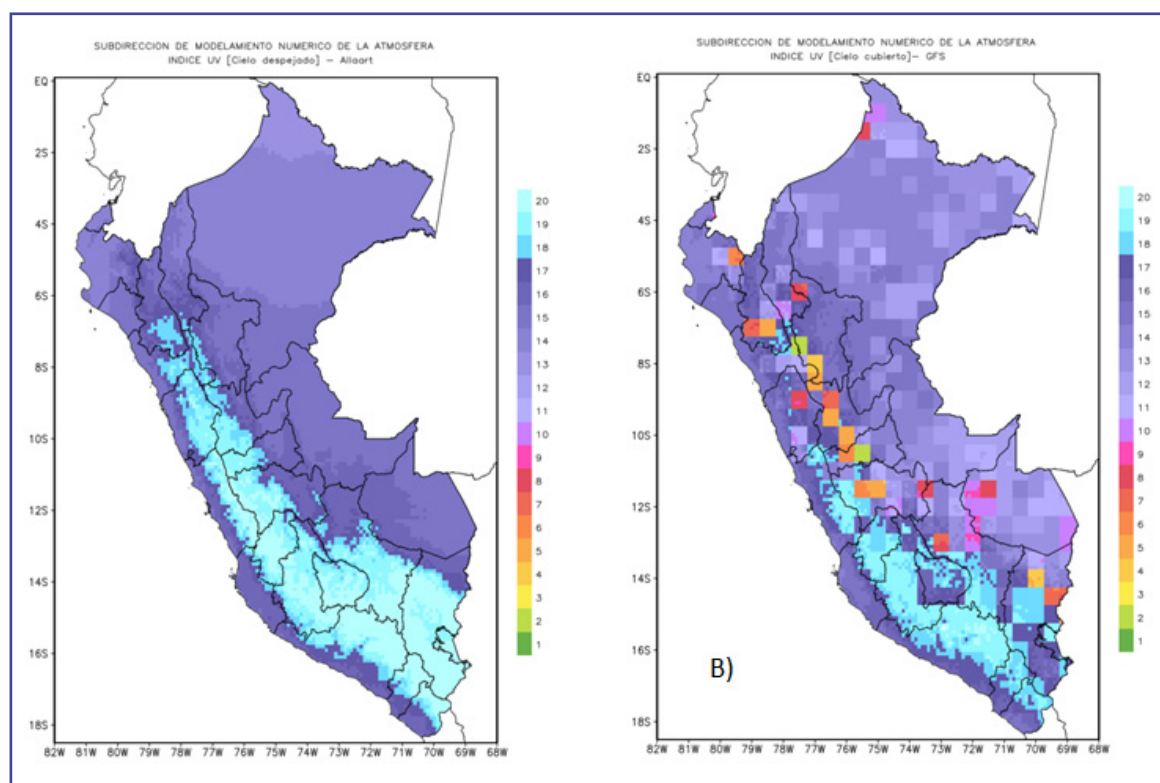
Productos a disposición del público

A continuación se muestra los mapas a nivel nacional del pronóstico del Índice de UV para cielo despejado y cubierto (Figura 24), para el día 5 de diciembre del 2016. Además, del pronóstico horario para un punto cercano a la ciudad de Arequipa (Figura 25).

En la Figura 25 se muestra el pronóstico del Índice UV horario para la ciudad de Arequipa, para el 5 de diciembre. La línea negra es el pronóstico para cielo despejado mediante la metodología de Allaart et al. Ambos han sido ajustados a la altitud de la ciudad de Arequipa.

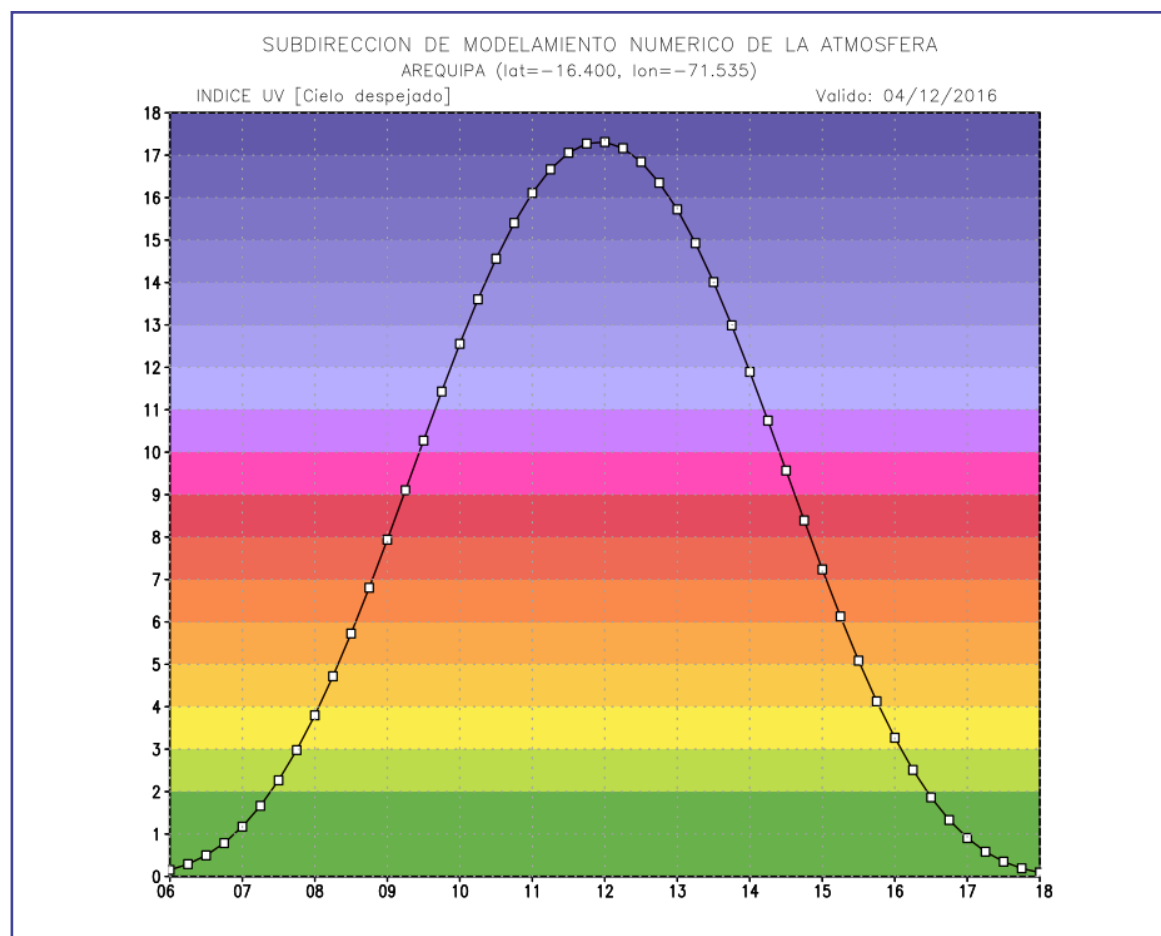
Cabe agregar que para áreas urbanas se producen importantes contaminantes atmosféricos (gases trazas y aerosoles), que absorben o reflexión de la radiación ultravioleta, como el ozono troposférico, el dióxido de azufre, material particulado inhalable (PM_{10}) y material particulado fino ($PM_{2.5}$) y el dióxido de nitrógeno. Por lo tanto las observaciones realizadas en ciudades con alta contaminación dan como resultado estimaciones de UVI menores a las que serían observadas en áreas rurales.

Figura 24: Pronostico del Índice UV máximo para el día 4 de diciembre



A) UVI para cielo despejado. B) UVI con cobertura nubosa obtenido del GFS.

Figura 25: Pronostico del Índice UV horario para la ciudad de Arequipa, para el 4 de diciembre. La línea negra es el pronóstico para cielo despejado mediante la parametrización de Allaart



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Bajo condiciones de cielo despejado la radiación solar ultravioleta (RUV), que llega a superficie puede ser adecuadamente modelada conociendo la columna de ozono total, el ángulo cenital solar que determina la longitud del camino que debe recorrer la radiación antes de llegar a superficie.
2. El índice UVI es un índice que indica el grado de peligro referido a la piel humana (exposición), de los efectos de la radiación UV. Este índice considera la radiación en el rango ultravioleta A y ultravioleta B.
3. El cálculo del UVI considerando sólo el rango UVB, subestima del valor del índice UVI y no se adecúa a los estándares internacionales.
4. La predicción del índice UV (UVI) se hace en muchos lugares en el mundo, con el fin de advertir a la población sobre el peligro de la radiación UV sobre su salud, es una práctica usual mostrar esta predicción bajo condiciones de cielo despejado y cielo cubierto.
5. La columna de ozono total obtenida por los satélites (en Unidades Dobson), el ángulo cenital solar (SZA) y el día del año, son los parámetros más importantes que determinan el UVI.
6. El índice UV busca comunicar que no solo el rango de UVB sino también de UVA, debe ser tomado en cuenta por el público para adoptar medidas de protección referidas a los efectos de la RUV. En tal sentido la red de observación de superficie debe tener en cuenta que el UVI debe ser calculado considerando todo el rango de radiación solar ultravioleta.
7. Es decir se debe tener en cuenta la curva espectral de radiación solar (entre longitudes de onda de 280 y 400 nm) incidente en el suelo, así como la respuesta de la piel humana a la radiación UV incidente en la misma mediante el espectro de acción eritemática). Este espectro pondera la curva de radiación espectral resaltando el mayor efecto dañino en las longitudes de onda correspondientes a la UVB.
8. Es posible poner a disposición del público un servicio de pronóstico orientado a informar del potencial de intensidad de UV con una cobertura nacional, con rigurosidad científica sin necesidad de invertir grandes sumas de dinero en establecer una red densa de sensores en superficie para determinar UVI.
9. Sin embargo debe tenerse en cuenta que este pronóstico es realizado como UVI máximo considerando cielo despejado y ausencia de contaminación atmosférica. Por lo tanto las observaciones en superficie en áreas urbanas registran UVI menores a los estimados por las fórmulas debido a la contaminación atmosférica.
10. Por lo tanto la red de sensores debe proveer información para el desarrollo de estudios e investigaciones y para validar la calidad de los pronósticos emitidos por

el SENAMHI y permitir hacer ajustes asociados a factores no tomados en cuenta en el pronóstico. En particular considerando ajustes más finos que incluyan aerosoles atmosféricos, contaminación atmosférica, etc.

11. La parametrización utilizada para el pronóstico de UVI, se ajusta muy bien al actual método utilizado por el SENAMHI, haciendo a su vez operativo el pronóstico de UVI para cielo despejado en forma automatizada, para las 194 capitales de provinciales del Perú.

12. Los resultados obtenidos son comparables a los pronósticos operativos emitidos por otros centros internacionales que usan esta parametrización a nivel global incluyendo el Perú.

13. Por lo tanto el SENAMHI puede difundir el pronóstico para 195 capitales provinciales del país, de la intensidad de la radiación solar ultravioleta, mediante el índice ultravioleta (UVI), como un indicador de su potencial para producir daño a las personas y para que se adopten medidas de protección. La difusión comprende:

- a) El pronóstico de la columna de ozono
- b) El pronóstico para cielo despejado es decir para UVI máximo a medio día solar en un mapa a escala nacional
- c) El pronóstico de UVI con cobertura nubosa a medio día solar en un mapa a escala nacional.
- d) El pronóstico de la evolución horaria del UVI para cada capital de provincia para cielo despejado.

14. La escala de colores que actualmente usa el SENAMHI debe ser cambiada a efecto de que su interpretación sea entendida a nivel internacional, como lo recomienda la OMM/OMS. Esta Nota Técnica establece los colores que utilizará oficialmente el SENAMHI como categorías de exposición.

15. Que conforme lo recomiendan los investigadores de la región sudamericana lo que es necesario no es cambiar el cálculo del UVI sino abrir la escala para reportar los altos valores de UVI que se registran regularmente en esta región del mundo.

16. Que se debe seguir fortaleciendo el importante esfuerzo desplegado por la institución para sensibilizar a la población de los efectos dañinos de la RUV y en este esfuerzo resaltar los efectos acumulativos de los daños provocados por esta radiación. En tal sentido se deben continuar con las campañas de sensibilización que incluyan propuestas innovadoras para mostrar los efectos de la RUV, como por ejemplo cámaras con capacidad de mostrar el espectro ultravioleta.

17. En estas campañas se debe resaltar los daños según tipo de piel, más que el tiempo máximo de exposición que se puede soportar, dado que los efectos de la RUV son acumulativos, así como las medidas de protección correspondientes.

18. Dado que se ha automatizado el pronóstico mejorando su cobertura espacial se puede difundir mediante app en los celulares y en general dispositivos móviles.

19. La actual red de monitoreo debe ser utilizada con fines de verificación y ajuste de los pronósticos.

20. Es necesario el desarrollo de una línea de investigación que estudie el ajuste del UVI por el efecto de aerosoles atmosféricos (ejemplo: PM_{10} y $PM_{2.5}$) y gases trazas (ejemplo: SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , etc).

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo prestado por la presidencia ejecutiva del SENAMHI y los colegas de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Allaart, M., M. van Weele, P. Fortuin, and H. Kelder (2004) "An empirical model to predict the UV-index based on solar zenith angles and total ozone", Meteorological Applications, Vol. 11, pp. 59-65.

Castanedo Cázares Juan Pablo, Torres Álvarez Bertha, Sobrevilla Ondarza Salvador, Ehnis Pérez Adriana y Gordillo Moscoso Antonio. Estimación del tiempo de exposición solar para quemadura en población mexicana. Gaceta Médica de México. 2012;148:243-7.

Elminir, H. K., Sensitivity of ultraviolet solar radiation to anthropogenic air pollutants and weather conditions. 2007. Atmospheric Research 84, 250-264.

Krotkov, N.A., Bhartia, P.K., Herman, J.R., Fioletov, V. and Kerr, J. (1998). Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols: 1. Cloud-free case. Journal of Geophysical Research 103: doi: 10.1029/98JD00233. issn: 0148-0227.

J. van Geffen, R. van der A, M. van Weele, M. Allaart and H. Eskes, in Surface UV radiation monitoring based on GOME and SCIAMACHY:: Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria, ESA publication SP-572, 2005 (CD-ROM).

G.I. Harrison y A.R. Young. Ultraviolet radiation-induced erythema in human skin Methods, 28 (2002), pp. 14-19 Medline

Madronich, S. (2007) "Analytic formula for the clear-sky UV index", Photochemistry and Photobiology, Vol. 83, pp. 1537-1538.

McKinlay A.F. and Diffey B.L. (1987), A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. CIE Journal, 6 (1): 17-22.

Organización Meteorológica Mundial, 1995 (Global Atmosphere Watch, N° 95).

Report of the OMM meeting of experts on UVB measurements, data quality and standardization of UV indices. Les Diablerets, Suiza, 22 a 25 de julio de 1994. Ginebra,

Rivas A, Rojas E, Madronish S. (2008) Aumento del índice solar ultravioleta con la altura. Revista chilena de ingeniería. Pág. 383-388.

Sola, Y., et al. (2008), Altitude effect in UV radiation during the Evaluation of the Effects of Elevation and Aerosols on the Ultraviolet Radiation 2002 (VELETA-2002) field campaign, J. Geophys. Res., 113, D23202, doi:10.1029/2007JD009742.

Zaratti et al. (2014), Proposal for a modification of the UVI risk scale. Francesco Zaratti, Rubén D. Piacentini, Héctor A. Guillén, Sergio H. Cabrera, J. Ben Liley and Richard L. McKenzie. Photochem. Photobiol. Sci., 2014,13, 980-985. DOI: 10.1039/C4PP00006D, Perspective

Vanicek K, Litynska Z, Schmalwieser A, UV Index for the Public. A guide for publication and interpretation of solar UV Index forecasts for the public prepared by the Working Group 4 of the COST713 Action UVB Forecasting EUR 19226 EN (2000)

Central telefónica: (511) 614 1414
Atención al usuario: (511) 470 2867
Predicción Meteorológica: (511) 614 1414 anexo 407
Pronóstico: (511) 614 1407

Consultas y sugerencias:
lalfaro@senamhi.gob.pe / allacza@senamhi.gob.pe / osanchez@senamhi.gob.pe



Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI